

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Инженерная школа энергетики

Отделение/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль Теоретическая и промышленная теплоэнергетика

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

| Тема работы  |
|--|
| <b>Экспериментальное исследование процессов<br/>влагоудаления из слоя лесного горючего материала на<br/>основе отходов лесопиления и деревообработки</b> |

УДК 674.032.047-047.37

Студент

| Группа | ФИО                              | Подпись | Дата |
|--------|----------------------------------|---------|------|
| 5Б5Б   | Коченовская Анастасия Евгеньевна |         |      |

Руководитель

| Должность                       | ФИО                        | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент НОЦ<br>И.Н. Бутакова ИШЭ | Бульба Елена<br>Евгеньевна | к.т.н., доцент            |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО                             | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|---------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент    | Подопригора Игнат<br>Валерьевич |                           |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО                             | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------|---------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Ассистент | Сотникова Анна<br>Александровна |                           |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Руководитель<br>Отделения/НОЦ/ООП | ФИО                           | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|-----------------------------------|-------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент                            | Антон Александр<br>Михайловна |                           |         |      |

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 13.03.01**  
**«Теплоэнергетика и теплотехника»**

| Код<br>результата                       | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)   |
|---|---|
| <i>Общекультурные компетенции</i>       |   |
| P1                                      | Использовать основы философских знаний для формирования мировоззренческой позиции   |
| P2                                      | Использовать основы экономических знаний в различных сферах деятельности  |
| P3                                      | Использовать основы правовых знаний в различных сферах деятельности   |
| P4                                      | Коммуникации в устной и письменной формах на русском и иностранном языках для решения задач межличностного и межкультурного взаимодействия  |
| P5                                      | Самоорганизация и самообразование   |
| P6                                      | Использовать приемы первой помощи, методы защиты в условиях чрезвычайной ситуации   |
| <i>Общепрофессиональные компетенции</i> |   |
| P7                                      | Осуществлять поиск, хранение, обработку и анализ информации из различных источников и баз данных, представлять ее в требуемом формате с использованием информационных, компьютерных и сетевых технологий  |
| P8                                      | Демонстрировать базовые знания в области естественнонаучных дисциплин, готовностью выявлять естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности; применять для их разрешения основные законы естествознания, методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования |
| <i>Профессиональные компетенции</i>     |   |
| P9                                      | Участвовать в сборе и анализе исходных данных для проектирования энергообъектов и их элементов в соответствии с нормативной документацией   |
| P10                                     | Проводить расчеты по типовым методикам, проектировать технологическое оборудование с использованием стандартных средств автоматизации проектирования в соответствии с техническим заданием  |
| P11                                     | Участвовать в проведении предварительного технико-экономического обоснования проектных разработок энергообъектов и их элементов по стандартным методикам  |
| P12                                     | Проведение экспериментов по заданной методике, обработке и анализу полученных результатов с привлечением соответствующего математического аппарата  |
| P13                                     | Обеспечивать соблюдение правил техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности, норм охраны труда, производственной и трудовой дисциплины   |
| P14                                     | Участие в организации метрологического обеспечения технологических процессов при использовании типовых методов контроля режимов работы технологического оборудования  |
| P15                                     | Обеспечивать соблюдение экологической безопасности на производстве и планировать экозащитные мероприятия и мероприятия по энерго- и ресурсосбережению на производстве   |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего  
образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа: Инженерная школа энергетики  
Направление подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника  
Отделение школы/НОЦ Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова

УТВЕРЖДАЮ:  
Антонова А.М.

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      (Дата)      (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|  |
|--|
| <b>бакалаврской работы</b>                               |
| (бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации) |

Студенту:

| Группа | ФИО                              |
|--------|----------------------------------|
| 5Б5Б   | Коченовской Анастасии Евгеньевне |

Тема работы:

|  |                    |
|--|--------------------|
| <b>Экспериментальное исследование процессов влагоудаления из слоя<br/>лесного горючего материала на основе отходов лесопиления и<br/>деревообработки</b> |                    |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)  | 13.05.2019 №3690/с |

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|  |  |
|--|--|
| <b>Исходные данные к работе</b><br><i>(наименование объекта исследования или проектирования;<br/>производительность или нагрузка; режим работы<br/>(непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид<br/>сырья или материал изделия; требования к продукту,<br/>изделию или процессу; особые требования к особенностям<br/>функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в<br/>плане безопасности эксплуатации, влияния на<br/>окружающую среду, энергозатратам; экономический<br/>анализ и т. д.).</i> | Объект исследования: два образца хвойных пород<br>древесины:<br><br>1. Опилки<br><br>2. Щепа |
|--|--|

|   |   |
|---|---|
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b><br><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i> | – постановка цели и задач исследования;<br>– обзор литературы;<br>– определение массы испарившейся влаги;<br>– расчет массовой скорости испарения;<br>– расчет парциального давления;<br>– анализ и обработка полученных результатов;<br>– анализ параметров, влияющих на коэффициент аккомодации;<br>– заключение; |
|---|---|

|  |                              |
|--|------------------------------|
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b><br><i>(с указанием разделов)</i> |                              |
| <b>Раздел</b>  | <b>Консультант</b>           |
| <b>Финансовый менеджмент</b>   | Подопригора Игнат Валерьевич |
| <b>Социальная ответственность</b>  | Сотникова Анна Александровна |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b> |  |
|---|--|

**Задание выдал руководитель:**

| Должность                       | ФИО         | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------------------|-------------|------------------------|---------|------|
| Доцент НОЦ<br>И.Н. Бутакова ИШЭ | Е.Е. Бульба | к.т.н., доцент         |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО                              | Подпись | Дата |
|--------|----------------------------------|---------|------|
| 5Б5Б   | Коченовская Анастасия Евгеньевна |         |      |

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

| Группа | ФИО                              |
|--------|----------------------------------|
| 5Б5Б   | Коченовская Анастасия Евгеньевна |

| Школа               |             | Отделение школы (НОЦ)     |                                |
|---------------------|-------------|---------------------------|--------------------------------|
| Уровень образования | Бакалавриат | Направление/специальность | Теплоэнергетика и теплотехника |

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

|  |   |
|--|---|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ):<br>материально-технических, энергетических, финансовых,<br>информационных и человеческих | Оклад инженера – 21760 руб.,<br>Оклад руководителя – 33664 руб.   |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов   | Премимальный коэффициент 30 %;<br>Коэффициент доплат и надбавок 20 %;<br>Районный коэффициент 30 %;<br>Коэффициент дополнительной заработной платы 12 %;<br>Накладные расходы 16 %. |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования  | Коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды 28 %.  |

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

|  |  |
|--|--|
| 1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения | Анализ конкурентных технических решений.   |
| 2. Планирование и формирование бюджета научных исследований  | Формирование плана и графика разработки<br>Формирование бюджета затрат на разработку |
| 3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования        | Определение потенциального эффекта разработки.                                       |

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

## Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО                          | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|------------------------------|------------------------|---------|------|
| Доцент    | Подопригора Игнат Валерьевич |                        |         |      |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО                              | Подпись | Дата |
|--------|----------------------------------|---------|------|
| 5Б5Б   | Коченовская Анастасия Евгеньевна |         |      |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

|               |                                  |
|---------------|----------------------------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                       |
| 5Б5Б          | Коченовская Анастасия Евгеньевна |

|                            |             |                                  |                                |
|----------------------------|-------------|----------------------------------|--------------------------------|
| <b>Школа</b>               |             | <b>Отделение школы (НОЦ)</b>     |                                |
| <b>Уровень образования</b> | Бакалавриат | <b>Направление/специальность</b> | Теплоэнергетика и теплотехника |

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

|   |   |
|---|---|
| Характеристика объекта исследования   | Объектом исследования является экспериментальное изучение процессов влагоудаления из слоя лесного горючего материала на основе отходов лесопиления и деревообработки  |
| <b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>   |   |
| <b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>  | Перечень нормативов: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Трудовой кодекс РФ,</li> <li>- Специальные правовые нормы трудового законодательства при работе с компьютером и орг. техникой,</li> <li>- Требования к организации рабочих мест пользователей,</li> <li>- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»,</li> <li>- СанПиН 2.2.4.542-96 «Гигиенические требования к видео-дисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».</li> </ul> |
| <b>2. Производственная безопасность</b><br>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов;<br>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов. | Анализ выявленных вредных факторов: <ul style="list-style-type: none"> <li>- недостаточная освещенность рабочей зоны,</li> <li>- отклонение параметров микроклимата,</li> <li>- повышенный уровень шума,</li> <li>- повышенный уровень электромагнитного излучения,</li> <li>- нервно-психические перегрузки.</li> </ul> Анализ выявленных опасных факторов: <ul style="list-style-type: none"> <li>- электрический ток,</li> <li>- короткое замыкание;</li> <li>- статическое электричество.</li> </ul>  |
| <b>3. Экологическая безопасность:</b>   | Воздействия объекта на атмосферу и гидросферу отсутствует.  |
| <b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>  | Возможной чрезвычайной ситуацией при экспериментальном исследовании является возникновение пожара на рабочем месте.   |

|   |  |
|---|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|---|--|

### Задание выдал консультант:

|                  |                              |                               |                |             |
|------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b> | <b>ФИО</b>                   | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Ассистент        | Сотникова Анна Александровна |                               |                |             |

### Задание принял к исполнению студент:

|               |                                  |                |             |
|---------------|----------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>                       | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 5Б5Б          | Коченовская Анастасия Евгеньевна |                |             |

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа 97 страниц, 13 рисунков, 45 таблиц, 49 источников литературы.

Ключевые слова: отходы лесопиления, древесная биомасса, массовая скорость испарения, процесс влагоудаления, парциальное давление, коэффициент аккомодации.

Объектом исследования являются отходы лесопиления и деревообработки хвойных пород деревьев (щепа, опилки), их свойства и параметры.

Цель работы – экспериментальное исследование процессов влагоудаления из слоя лесного горючего материала на основе отходов лесопиления и деревообработки, а также нахождение скорости испарения жидкости, расчет коэффициента аккомодации и парциального давления, которые позволяют оценить параметры, влияющие на процесс испарения жидкости при сушке биомассы.

В результате эксперимента получены результаты изменения массовой скорости испарения, коэффициента аккомодации и парциального давления для щепы и опилок. Получены графические зависимости массовой скорости испарения от времени испарения при разных температурах в сушильном шкафу.

Область применения: теплоэнергетика, лесная промышленность (сушка древесины).

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 10 |
| 1 Обзор литературы .....   | 11 |
| 1.1. Характеристика и строение хвойной древесины.....  | 11 |
| 1.2. Виды древесных отходов и классификация отходов .....  | 15 |
| 1.3. Сушка биомассы, ее виды .....   | 21 |
| 1.4. Особенности сжигания древесной биомассы.....  | 25 |
| 1.5. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании древесины<br>.....  | 29 |
| 1.6. Состояние мировой биоэнергетики.....  | 30 |
| Выводы по обзору литературы .....  | 33 |
| 2 Экспериментальное исследование процесса влагоудаления из слоя лесного<br>горючего материала на основе отходов лесопиления и деревообработки..... | 34 |
| 2.1 План эксперимента .....  | 34 |
| 2.2 Описание экспериментальной установки.....  | 35 |
| 2.3 Образцы для проведения эксперимента .....  | 37 |
| 3 Результаты экспериментального исследования массовой скорости<br>испарения жидкостей.....   | 38 |
| 3.1 Результаты расчёта погрешности измерений.....  | 51 |
| 3.2 Расчет парциального давления и коэффициента аккомодации .....  | 58 |
| 4 Анализ полученных результатов измерений.....   | 63 |
| Выводы по экспериментальному исследованию .....  | 66 |
| 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение...   | 67 |
| 5.1. Анализ конкурентных технических решений.....  | 67 |
| 5.2. SWOT-анализ.....  | 69 |



|  |    |
|--|----|
| 5.3. Планирование научно-исследовательских работ .....   | 69 |
| 5.3.1. Структура работ в рамках научного исследования .....  | 69 |
| 5.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ .....   | 70 |
| 5.3.3. Разработка графика проведения научного исследования .....   | 71 |
| 5.3.4. Бюджет научно-технической разработки .....  | 74 |
| 5.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .. | 78 |
| 5.5. Определение потенциального эффекта разработки .....   | 79 |
| 6 Социальная ответственность .....   | 79 |
| 6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ....  | 80 |
| 6.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства .....   | 80 |
| 6.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны ....  | 81 |
| 6.2. Производственная безопасность .....   | 82 |
| 6.2.1. Анализ вредных факторов проектируемой производственной среды .....  | 84 |
| 6.2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов на исследователя .....                         | 89 |
| 6.3. Экологическая безопасность .....  | 89 |
| 6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....   | 90 |
| Заключение .....   | 92 |
| Список литературы .....  | 93 |

## **Введение**

Отрасль лесопиления и деревообработки прибыльна и хорошо развита в странах мира, но в процессе образуется большое количество отходов, простое складирование которых является огромной проблемой и несет опасность для окружающей среды. Поэтому представляется возможным утилизация этих отходов, путем их вторичного использования в качестве биотоплива или различных биодобавок к другим видам топлива.

Для того чтобы улучшить качества биомассы и извлечь наибольшую пользу, нужно позаботиться об уменьшении влагосодержания, поэтому одним из этапов подготовки биомассы к её сжиганию, является сушка.

Сушка представляет собой процесс удаления влаги из материала путем испарения содержащейся в нем жидкости за счет подведения тепла к нему. Сушка древесины и её отходов бывает: естественной – на открытом воздухе и искусственной – в специальных сушильных установках. Приоритетной является искусственная, потому что сокращается время и повышается объём и качество материала. Поэтому стоит такая задача, как улучшение данного процесса, разработкой принципиально новых способов влагоудаления, которые будут отличаться малой энергоемкостью и высокой интенсивностью. Снижение энергоемкости процессов сушки приобретает большое значение в связи с напряженным балансом энергоресурсов.

Таким образом, исследование процесса сушки является актуальной задачей.

Целью данной работы является экспериментальное исследование процессов влагоудаления из слоя лесного горючего материала на основе отходов лесопиления и деревообработки.

## **1 Обзор литературы**

### **1.1. Характеристика и строение хвойной древесины**

Древесные породы делятся на две группы: хвойные, лиственные. Наиболее применяемые в деревообработке хвойные породы (сосна и ель) и лиственные (береза и осина). Качество древесины оценивают по ее физическим и механическим свойствам, от которых зависит область ее применения [1].

Древесина хвойных пород отличается простым строением и радиальным расположением основных элементов строения древесины. Древесина хвойных пород обладает большей прямоволокнистостью. Смоляные ходы можно назвать характерной особенностью строения хвойных пород древесины. Они бывают вертикальными и горизонтальными. Горизонтальные проходят по сердцевинным лучам. Вертикальные смоляные ходы представляют тонкие узкие каналы, заполненные смолой. Сосна и ель имеют хорошо видимые годовичные слои с четкой границей между ранней и поздней древесиной. Сосна в отличие от ели имеет довольно крупные и многочисленные смоляные ходы, а у ели они малочисленные и мелкие. Древесина сосны средней плотности обладает достаточно высокой прочностью, противостоит гниению, хорошо обрабатывается. Ель несколько уступает древесине сосны по прочности, плотности и биостойкости. Кроме того, её труднее обрабатывать из-за большого обилия сучков и их повышенной твердости [2].

В таблице 1 приведены характеристики основных хвойных пород древесины.

Таблица 1 – Характеристики основных хвойных пород древесины

| Порода и её основные свойства   | Внешние признаки  | Применение  |
|---|---|---|
| Сосна   |   |   |
| Древесина средней плотности, достаточно высокой прочности, стойкая против гниения, хорошо обрабатывается. | Древесина, имеющая немного розовое ядро, которое со временем становится буровато-красным. Ядровая порода со смоляными ходами, которые сосредоточены в основном в поздней древесине. Заболонь широкая имеет цвет от желтоватого до розового. Годичные слои достаточно хорошо видны на всех разрезах с четкой границей между ранней и поздней древесиной, но сердцевинные лучи не видны. Имеет только мутовчатые сучки. | Используется в строительстве, машиностроении, мебельном производстве, на железнодорожном транспорте и др. Распространена как сырье для химической переработки с целью получения целлюлозы, кормовых дрожжей.. |
| Лиственница   |   |   |
| Древесина, будучи высушенной, слабо подвержена гнили; хорошо противостоит действию воды.                  | Годичные слои хорошо просматриваются при всех разрезах. Ствол лиственницы на 70 % состоит из ядра, резко выделяющегося по свойствам и цвету. Ядровая часть древесины содержат основную часть веществ, придающих лиственнице повышенную стойкость. Темная. Заболонь у лиственницы узкая, 8-20 мм, 25-30 % от древесной массы. Светлая. По физико-механическим свойствам уступает ядру.                                 | В строительстве, деревянном судостроении, целлюлозно-бумажном производстве, полезащитном лесоразведении.  |

Продолжение Таблицы 1

| Ель   |   |   |
|---|---|---|
| <p>Физико-механические свойства (плотность, твердость, прочность) уступают сосне (примерно на 10%), но по коэффициенту качества несколько превосходит ее на 3-4%. Ель достаточно трудно обрабатывается из-за обилия сучков и их повышенной твердости. Но можно выделить такие достоинства: длинные волокна, односторонность строения, малая смолистость, устойчивый белый цвет, высокая способность резонировать.</p> | <p>Порода безъядровая, спелодревесная и имеет немногочисленные смоляные ходы. Древесина с однородным белым цветом, иногда со слабым желтоватым или розовым оттенком. Годичные слои четко видны на всех разрезах, но поздняя древесина немного отличается от ранней более темным цветом. Сердцевинные лучи не видны. Главное отличие от сосны – более крупные сучки расположены мутовками, между которыми попадают одиночные сучки с меньшим размером.</p> | <p>В аналогичных областях, что и древесина сосны, но чаще - в целлюлозно-бумажной промышленности. А также, - в музыкальной промышленности для дек. Из коры ели можно получить дубильные вещества. Еловые материалы хорошо экспортируются.</p> |

Продолжение Таблицы 1

| Пихта   |   |  |
|---|---|--|
| <p>Физико-механические свойства пихты сравнительно хуже по сравнению с древесиной ели.</p>  | <p>Порода безъядровая, схожа с древесиной ели, которая отличается отсутствием смоляных ходов. Имеет однородный белого цвет. Годичные слои хорошо видны на всех разрезах. Поздняя же древесина отличается от ранней более темным цветом. Большие сучки расположены мутовками, между которыми встречаются мелкие одиночные сучки.</p> | <p>Применяется наравне с древесиной ели.</p>   |
| Кедр  |   |  |
| <p>Древесина достаточно мягкая, легкая, а также легко поддается обработке. Если рассматривать физико-механические свойства, то кедр занимает промежуточное место между древесиной ели и пихты, но превосходит их по стойкости против гниения.</p> | <p>Древесина с ядром светлого или желтовато-розового цвета. Годичные слои достаточно заметны. Переход от ранней древесины к поздней плавный, растушеванный. Сердцевинные лучи не видны. Смоляных ходов значительно меньше, чем у сосны, но они имеют более крупные размеры.</p>   | <p>В тех же областях, что сосна и ель. Характерная область применения - карандашное производство. Кедровые орехи используют для получения масла, которое используется в пищевых и технических целях.</p> |

Плотность и твердость являются основными техническими показателями свойств древесины, так как они более точно отражают качество древесины, которая используется в строительстве, а также в качестве технологического материала [3].

Рассматривая такой показатель как плотность можно сказать, что она влияет на все физические и механические свойства древесины, а так же отвечает за качество и долговечность деревянных изделий. Можно сделать такой вывод, что плотность следует учитывать при применении древесины в качестве конструкционного и технологического сырья. Именно поэтому изучение закономерностей изменения плотности древесины после длительного воздействия температуры и влажности представляются актуальными и востребованными, как с научной, так и с практической стороны.

Обратимся к другому показателю как твердость, которая характеризует способность древесины оказывать сопротивление, если происходит вдавливание другого тела из более твердого материала. Приходим к такому выводу, что именно по показателю твердости можно судить о сложности обработки режущими инструментами, а также о затратах электроэнергии на механическую обработку или энергии человека на ручную обработку.

## **1.2. Виды древесных отходов и классификация отходов**

В процессе лесозаготовок, лесопиления и деревообработки неизбежно образуются древесные отходы в виде отдельных частей биомассы дерева, представляющие собой вторичные древесные ресурсы [5]. Это может быть технологическая щепка (стружка), получаемая при агрегатной переработке бревен, стружка от пиления древесины вдоль волокон, опилки, образующиеся при поперечном пилении древесины. Начиная с первоначальной стадии обработки – рубки леса и вывоза хлыстов, и заканчивая последней стадией – обработкой древесины, данный процесс сопровождается отходом части древесины, которая в дальнейшем не используется в производстве [6].

Части дерева на производственных участках в виде сучьев, ветвей, листьев, хвои и коры, а также маломерные деревья, спиливаемые в процессе

подготовки лесосек к разработке, также являются отходами, но не являются готовой продукцией, пригодной для использования без доработки [7].

Древесные отходы – ценное вторичное сырье для производства разнообразных изделий, товаров, материалов, продуктов. Чтобы снизить себестоимость основной продукции из древесины, нужно добиваться уменьшения образования отходов в основном производстве и по максимуму использовать отходы на другие виды продукции, т.е. стремиться к более полному и полезному использованию древесного сырья. На рисунке 1 представлена технологическая схема лесопильного производства.



Рисунок 1 – Технологическая схема лесопильного производства

В источнике [8] автором приводится классификация видов и количества кусковых отходов в различных деревообрабатывающих производствах.

Древесные отходы можно классифицировать по разным признакам: месту образования в технологическом процессе заготовки и переработки древесины, физикомеханическим и химическим свойствам, возможности использования, технической и экономической доступности. Когда



происходит выбор признака классификации нужно учесть основные направления использования отходов. Показатели размера и качества определяют дальнейшее направление использования отходов, а также потребительские свойства конечного продукта переработки. Можно прийти к такому выводу, что классификация древесных отходов обязана учитывать экономические факторы. Сбор и переработка отходов лесопиления и деревообработки связаны с различными затратами, поэтому отходы будут характеризоваться разными уровнями эффективности переработки, а также разными возможностями их использования и отличающимися условиями доставки конечному потребителю.

Рассматривая классификацию отходов по ассортименту исходного сырья, их можно разделить на отходы пиломатериалов, фанеры, древесноволокнистых плит и др.

Если учитывать породу древесины, то отходы делятся на отходы хвойных и лиственных пород деревьев.

По влажности отходы подразделяются на сухие (с влажностью 15%), полусухие (с влажностью 15-30%), влажные (с влажностью выше 30%).

По структуре отходы бывают кусковые, сыпучие и др. Твердые отходы, именуемые также кусковыми, представляются в деревообрабатывающей промышленности – обрезки, в лесопилении это рейки и горбыль, в лесозаготовительной промышленности это ветви, сучья, вершины, корни, пни. Мягкие отходы, которые еще можно назвать сыпучими, получают в деревообрабатывающем производстве и лесопилении в виде стружки, опилок и древесной пыли [7].

Обработка древесины производится поэтапно, из чего следует, что отходы можно разделить на те, которые связаны с заготовкой леса (ветви, вершины, пни, корни, кору, обрезки), а также на отходы первичной обработки древесины (рейки, горбыли, обрезки, стружка, опилки, кора, рванина), получаемые в процессе лесопиления; на отходы вторичной

обработки, которые получают в мебельном и столярном производстве; и на отходы строительства, такие как обрезки, стружки и опилки [8].

Авторами [7, 9, 10] представлена классификация древесных отходов, а также области их применения, также приводятся размеры и необходимые требования древесных отходов.

В таблице 2 приведены основные направления использования древесных отходов [11].

Таблица 2 – Направления использования древесных отходов

| Группы и виды отходов                        | Направление использования (производство) |         |            |          |           |        |
|--|--|---------|------------|----------|-----------|--------|
|  | Целлюлозно-бумажное                      | Плитное | Химическое | Кормовое | Топливное | Прочие |
| 1.Кусковые отходы:                           |  |         |            |          |           |        |
| Горбыли, рейки                               | +  | +       | +          | –        | +         | +      |
| Отрезки пиломатериалов, обрезки досок и т.д. | +  | +       | +          | +        | +         | +      |
| 2. Мягкие отходы                             |  |         |            |          |           |        |
| Опилки                                       | –  | +       | +          | +        | +         | +      |
| Стружки                                      | +  | +       | +          | +        | +         | +      |
| Древесная пыль                               | –  | +       | –          | –        | +         | –      |
| 3. Кора                                      | –  | +       | +          | +        | +         | +      |

В России и за рубежом для развития целлюлозно-бумажного и плитного производства возникает потребность в технологической щепе, которая в свою очередь является самым распространенным видом продукции, получаемой из отходов всех деревообрабатывающих производств.

В современном мире, где переработка и вторичное использование биомассы является перспективной и развивающейся отраслью, древесные отходы стали основой для производства заменителей деловой древесины, экономичных материалов и изделий, отсюда следует, что ассортимент и объем производства материалов из отходов лесопиления и деревообработки постоянно расширяется и модернизируется.

В свою очередь древесная биомасса используется еще и в народном хозяйстве [12]. Был найден самый простой и относительно дешевый способ утилизации древесных отходов, такой как использование их в качестве кормовых добавок и удобрений в сельском хозяйстве. Чтобы вернуть органику в круговорот природы, а также повысить плодородие почв и улучшить их структуру, целесообразно использовать опилки и кору, как удобрения только после предварительного компостирования. Оно заключается в устранении недостатка азота и доведения состава минеральных веществ до оптимального приемлемого уровня, который будет соответствовать типу почв, на которых будет использоваться удобрение.

Изучив достаточное количество технической литературы можно сделать вывод о том, что количество отходов лесопиления и деревообработки зависит от качества поставляемого сырья, а также от типа и размера конечной продукции, еще стоит отметить, что много зависит от техновооруженности и мощности предприятия.

В таблице 3 приведена номенклатура отходов деревообрабатывающих производств.

Таблица 3 – Номенклатура отходов деревообрабатывающих производств

| Наименование       | Группа отходов по структуре | Характеристика  | Размеры, мм |         |           |
|--------------------|-----------------------------|---|-------------|---------|-----------|
|                    |                             |   | длина       | ширина  | толщина   |
| Рейка обрезная     | Кусковые крупные            | Боковая часть доски, отделяемая при продольном раскрое необрезной доски                 | 1000-6500   | —       | —         |
| Короткомер крупный | Кусковые крупные            | Неполномерные короткие отрезки пиломатериалов   | 500-1500    | 100-200 | 12-50     |
| Недомерок средний  | Кусковые средние            | Отрезки после продольной и поперечной распиловки  | 250-500     | 100-220 | 16-35     |
| Мелочь кусковая    | Кусковые мелкие             | Мелкие отрезки и срезки после продольной и поперечной распиловки                        | До 250      | 15-60   | 12-30     |
| Стружка            | Сыпучие                     | Древесина, отделяемая резцами при строгании или фрезеровании                            | 2-25        | —       | 0,2-1,5   |
| Опилки             | Сыпучие                     | Отделяемая в процессе распиловки зубьями пил часть древесины                            | 1-5         | —       | 0,1-3     |
| Древесная пыль     | Сыпучие                     | Пылевидные частицы древесины, измельчаемой в процессе обработки резцами или шлифованием | —           | —       | 0,01-0,02 |

В источнике [13] автором представлена информация о строении древесины и частях растущего дерева, рассмотрены основные физические, химические и механические свойства древесины. Вдобавок изложены пороки древесины и даны характеристики основных коммерческих пород древесины. Рассмотрены вопросы стандартизации и классификации лесных товаров, а также приведены товароведческие сведения о лесоматериалах и различных видах древесного материала.

### **1.3. Сушка биомассы, ее виды**

Изделия, которые изготовлены из сырой древесины, впоследствии могут изменять свои размеры. Чтобы предотвратить это перед переработкой древесина нуждается в сушке. Процесс сушки происходит путем перемещения влаги от середины к поверхности древесины, а также испарения воды с поверхности материала. Испарение с поверхности происходит гораздо быстрее, чем перемещение воды в объеме древесины [14].

Следует отметить тот факт, что вода внутри древесины находится в двух состояниях, свободная и связанная влага.

Свободная вода – это наибольшая часть воды, которая расположена в древесине. Она заполняет капиллярные сосуды и межклеточные пустоты, поэтому она удаляется первой и процесс сушки протекает быстро. Хотя процесс и не требует высоких температур, но требует определенную осторожность в скорости влагоудаления.

Связанная или гигроскопическая вода – это остаточная часть воды, которая содержится внутри клеточных мембран, поэтому её удаление гораздо сложнее и требует достаточно высоких температур. Также можно отметить тот факт, что удаление связанной воды приводит к изменению геометрических размеров высушиваемого материала.

Точка насыщения волокон — это та влажность, при которой вся свободная влага удалена из дерева, и в древесине находится только связанная вода.

Абсолютная влажность представляет собой процентное отношение массы влаги, которая содержится в древесине, к массе абсолютно сухой древесины, именно поэтому она используется для количественной характеристики влагосодержания при деревообработке. Следовательно, когда влажность древесины достигает 28-30%, это говорит о том, что вся свободная влага удалена, стоит отметить то, что процентная величина влажности не зависит от породы дерева. После удаления свободной влаги начинается процесс удаления связанной воды, находящейся в стенках клеток.

Существуют два способа сушки дерева: атмосферный и искусственный [14].

Рассматривая атмосферную сушку можно сказать о том, что она представляет собой процесс выдерживания сырых пиломатериалов в штабелях под кровлей на открытом воздухе в специальных зданиях без подогрева. Для такой сушки потребуются внушительные размеры места хранения и значительного количества времени процесса. Можно выделить такое достоинство, как низкая стоимость. Но такая сушка имеет ряд недостатков, как сезонность, возможность грибковых поражений древесины, а также растрескивания концов пиломатериалов, и главный недостаток это большая продолжительность. Для того чтобы ускорить процесс получения качественной конечной продукции применяется искусственная сушка.

Искусственная сушка происходит в специальных сушильных установках, которые можно разделить на: конвективные, в которых сушка древесины производится, проходящим через штабель нагретым воздухом; кондуктивные, в которых передача теплоты материалу происходит при непосредственном контакте с нагретой поверхностью; радиационные, в которых передача тепла происходит посредством излучения; диэлектрические, в которых нагрев производится электромагнитным полем высокой частоты; индукционные, в которых электромагнитным полем промышленной частоты происходит нагрев ферромагнитных пластин. Но сушильные установки разделяются еще на две категории. Первая это

установки нормального давления, где древесины сушится при атмосферном давлении. Вторая это вакуумные установки, в которых процесс сушки происходит в разреженной среде.

Искусственная сушка материала преследует ряд задач, из которых можно выделить три основные: получение продукции высокого качества с соответствующей влажностью; проведение процесса сушки в минимальные сроки и с минимальной затратой электроэнергии.

Изучив процесс сушки можно выделить такой трудный момент, как создание условий, которые будут ускорять движение воды из сердцевины древесины к её поверхности. Поэтому можно сделать вывод о том, что скорость перемещения влаги зависит от температуры, от степени вакуума в сушильной камере, от большего перепада температур и от разности концентраций, потому что вода движется от места с более насыщенной влагой к местам с меньшей насыщенностью.

Древесина имеет многообразие анатомических элементов и достаточно сложное строение клеточных стенок, поэтому является анизотропным телом. На анизотропность влияют условия произрастания и формирования дерева. Нельзя не отметить то факт, что свойства древесины зависят от количества влаги, которая в ней содержится. Преимущества сухой древесины перед влажной это более хорошая формоустойчивость и достаточно высокие прочностные показатели, а также больший срок службы, поэтому древесину необходимо подвергать обязательному процессу влагоудаления.

Древесину нельзя назвать абсолютно упругим телом, поэтому она не обладает идеальной упругостью из-за того, что в ней развивается остаточная деформация, которая сохраняется после устранения вызвавших её усилий. Вдобавок можно сказать о том, что при изменении жесткости материала при снижении влажности и повышении температуры, происходит процесс преобразования упругих деформаций в остаточные [15].

В данных [16] рассмотрены известные устройства для сжигания отходов переработки древесной биомассы, предложена новая оригинальная конструкция циклонного предтопка аналогичного назначения.

В [17] приведены материалы о состоянии современной энергетики, проблемах и мерах по использованию возобновляемых источников, о влиянии различных видов топлива на экологию.

В учебнике Кречетова И. В. рассмотрены теория, технология, техника и организация сушки древесины. Описаны свойства и применение в сушильной технике водяного пара, воздуха и продуктов сгорания как сушильных агентов. Приведены сведения об эксплуатации лесосушильных установок, экономичности сушки, усовершенствования техники и технологии, улучшения качества сушки [18].

В работе [19] приведены результаты по повышению эффективности и качества сушки измельченного растительного сырья путем использования аппарата тарельчатого типа, а также проведена серия экспериментальных исследований, направленных на выявление энергоэффективности предложенной технологии сушки.

В статье [20] автором предлагается методика расчета прогрева рубленой коры деревьев в плотном слое с учетом полученных необходимых экспериментальных данных, впоследствии установлена взаимосвязь продолжительности прогрева кусков коры до начала выхода летучих веществ и доли вышедшей влаги при этом.

Автором статьи [21] были рассмотрены математические модели системы автоматического управления, которые на практике позволили реализовать многокритериальные системы компьютерного управления, тем самым дав возможность провести эффективное управление процессом сушки древесины по заданным технологическим параметрам с высокими техническими, экологическими и экономическими показателями.



#### **1.4. Особенности сжигания древесной биомассы**

Как известно серьезное влияние на конструкцию топочных устройств оказывают технологические свойства биомассы [22].

Можно отметить, что древесная биомасса в качестве топлива имеет некоторые специфические особенности. Основной важной особенностью является отсутствие в составе серы и фосфора. Установлено, что основной потерей тепла в различных котлоагрегатах представляется потеря тепловой энергии с уходящими газами. Как известно, что величина этой потери определяется температурой уходящих газов, которая поддерживается не ниже 200–250 °С, но при сжигании же древесных отходов, которые не содержат серу, эта температура может быть понижена до 110–120 °С, что позволит существенно повысить КПД котлоагрегатов.

Так как влажность древесины варьируется в очень широких пределах, например, в деревообрабатывающем и мебельном производствах влажность различных отходов может составлять 10-12%, в лесозаготовительных предприятиях 45–55%, влажность коры при окорке отходов после сплава или сортировки в водных бассейнах достигает 80%, можно сделать вывод о том, что повышение влажности древесного топлива снижает производительность и КПД котлоагрегатов. Поэтому целесообразно и необходимо в котельных лесопромышленных предприятий предусмотреть проведение мероприятий по снижению влажности древесного топлива, которое поступает в топочные устройства [23].

Можно выделить, что характерной особенностью древесины как топлива является незначительное содержание внутренней золы, которое не превышает 1 %, но в то же время внешние минеральные включения у отходов лесозаготовок иногда достигают 20%. Зола, образующаяся при сгорании чистой древесины тугоплавка, и удаление ее из зоны горения топки не представляет особой технической сложности. Минеральные включения в древесной биомассе легкоплавки. Если происходит сгорание древесины со значительным их содержанием, то образуется спекшийся шлак, удаление

которого из высокотемпературной зоны топочного устройства затруднено и требует для обеспечения эффективной работы топки особых технических решений. Спекшийся шлак, образующийся при сжигании высокосольной древесной биомассы, имеет химическое сродство с кирпичом, и при высоких температурах в топочном устройстве спекается с поверхностью кирпичной кладки стенок топки, что затрудняет шлакоудаление.

Несмотря на то, что сжигание древесной биомассы является старейшей и наиболее развитой технологией получения тепловой и электрической энергии, даже в современное время это остается актуальной темой для дальнейшего развития с точки зрения повышения КПД и улучшения экологических характеристик. В настоящее время используются следующие основные технологии сжигания древесной биомассы: сжигание в вихревой (циклонной) топке, сжигание распыленного сырья в горелке, сжигание на решетке, сжигание с загрузкой сырья распределительным стокером, сжигание в кипящем слое, сжигание во вращающейся печи [24,25].

Сжигание в вихревых топках. Сущность этого метода заключается в следующем, с помощью системы воздушных сопел в топке создается вихрь, в котором происходит сгорание взвешенных частиц биомассы. Есть определенные рекомендуемые размеры частиц биомассы, которые должны быть не более 10-12 мм. Можно выделить такие преимущества, как простота осуществления на действующих котлах, достаточно высокие технические и экологические показатели топочного процесса, а также реальная возможность воплощения в топках газомазутных котлов, которые имеют малые объемы. Но есть и недостатки, например, в процессе сжигания биомассы вся содержащаяся в ней зола транспортируется топочными газами по тракту котла, что приводит к повышенному износу труб, и вдобавок к необходимости довольно частой чистки поверхностей нагрева и газового тракта котла от шлаковых и зольных отложений.

Сжигание в вихревых горелках. В таких горелках могут сжигаться очень мелкие и сухие отходы древесины, которые имеют влажность до 20%, такие как опилки или шлифовальная пыль. Как правило, при этом требуется подсветка мазутом или природным газом. Можно выделить такие преимущества, как более эффективное использование мощности котла; обеспечение высокого КПД котла, и возможность сжигания традиционного топлива в той же горелке, что и биомассы. Главным недостатком можно назвать высокие затраты, которые связаны с измельчением и сушкой сырья.

Сжигание на решетках. Чтобы разделить золу и загружаемое сырье в топках используются решетки. Известны решетки различного типа, например, неподвижные водоохлаждаемые; подвижные водоохлаждаемые; подвижные воздухоохлаждаемые и вращающиеся. Для того чтобы улучшить процесс подачи воздуха, обеспечить равномерную загрузку и удаление золы, конструкции решеток постоянно совершенствуются [26].

Сжигание в реторте с нижней подачей сырья. Эта технология является наиболее распространенной. Такие топки могут использоваться только на установках небольшой мощности для сжигания малозольной биомассы, например, щепа и опилки, имеющие влажность до 40%, для сжигание высокозольной биомассы такой, как кора, требуется более эффективная система удаления золы. Потому что частицы спекшийся золы, которые покрывают поверхность слоя топлива, могут вызвать нестабильность процесса в топках с подачей сырья снизу.

Сжигание на подвижных решетках. Эта технология сжигания в большинстве случаев применяется для биомассы с повышенной влажностью, зольностью и различным фракционным составом. Решетки должны быть качественно сконструированы, чтобы обеспечивать равномерное распределение топлива по всей поверхности и равномерный подвод первичного воздуха ко всем частям решетки. Иначе возможны шлакование, образование прогаров, большого количества летучей золы и увеличения количества избыточного кислорода, который необходим для полного

сгорания. Недостаток данного способа в том, что решетка требует определенного обслуживания и ее загрузочная способность мала.

Сжигание с загрузкой сырья распределительным стокером. Эта технология является модификацией сжигания на решетке и применяется в крупных котлах.

Сжигание во вращающейся печи. Процесс происходит при постоянном встряхивании и перемешивании сырья, потому что топка, имеющая цилиндрическую форму, непрерывно вращается. Главным достоинством данной технологии является универсальность в отношении сырья, потому что можно сжигать разные виды биомассы и отходов. Технология преобладает для сжигания бытовых и промышленных отходов.

Сжигание в кипящем слое. Достоинством технологии можно выделить гибкость топок по отношению к размерам частиц и влажности биомассы, кроме того существует возможность использования смеси из биомассы различного типа, т.е. проводить совместное сжигание этих смесей с другими видами топлив. Но крупнейшим недостатком можно выделить трудность эксплуатации [27].

Ротационный принцип сжигания. Этот принцип применяется в теплоэнергетических установках нового поколения, где естественный процесс горения происходит при недостатке воздуха. Данный способ позволяет сжигать древесину, не образуя пылевидные выбросы. Метод ротационного сжигания позволяет применять в качестве топлива различные материалы: пеллеты, обрезки, древесную щепу и опилки.

Чтобы решить часть экономических проблем промышленных и жилищно-коммунальных предприятий и снизить себестоимость вырабатываемой энергии, в наше время необходимо вторично применять и перерабатывать отходы деревообработки и лесопиления, которые зачастую имеют небольшую стоимость, поэтому возникает возможность и появляются реальные пути преодоления крайне неэффективного и расточительного использования традиционных топливных ресурсов [28].

## 1.5. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании древесины

Данный вопрос уже частично рассматривался выше, но стоит упомянуть об этом подробнее. Древесная биомасса характеризуется высоким содержанием летучих компонентов и малым количеством угля, образующемся при ее сжигании. Известно, что содержание влаги уменьшается от степени выгорания топлива, это обусловлено тем, что влага начинает испаряться на этапе выхода летучих веществ. На первых этапах фазы выхода летучих веществ может происходить повышение уровня выбросов от неполноты сгорания топлива, поэтому влажность оказывает негативное воздействие на процесс горения только на начальных этапах. Чтобы была возможность использования отходов лесопиления и деревообработки взамен традиционному топливу, должно выполняться такое необходимое условие, как полное сгорание и эффективность процесса горения. Процесс сгорания, представленный на рисунке 2, должен обеспечивать высокую степень использования энергии с соблюдением норм выбросов загрязняющих веществ ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) [29,30].

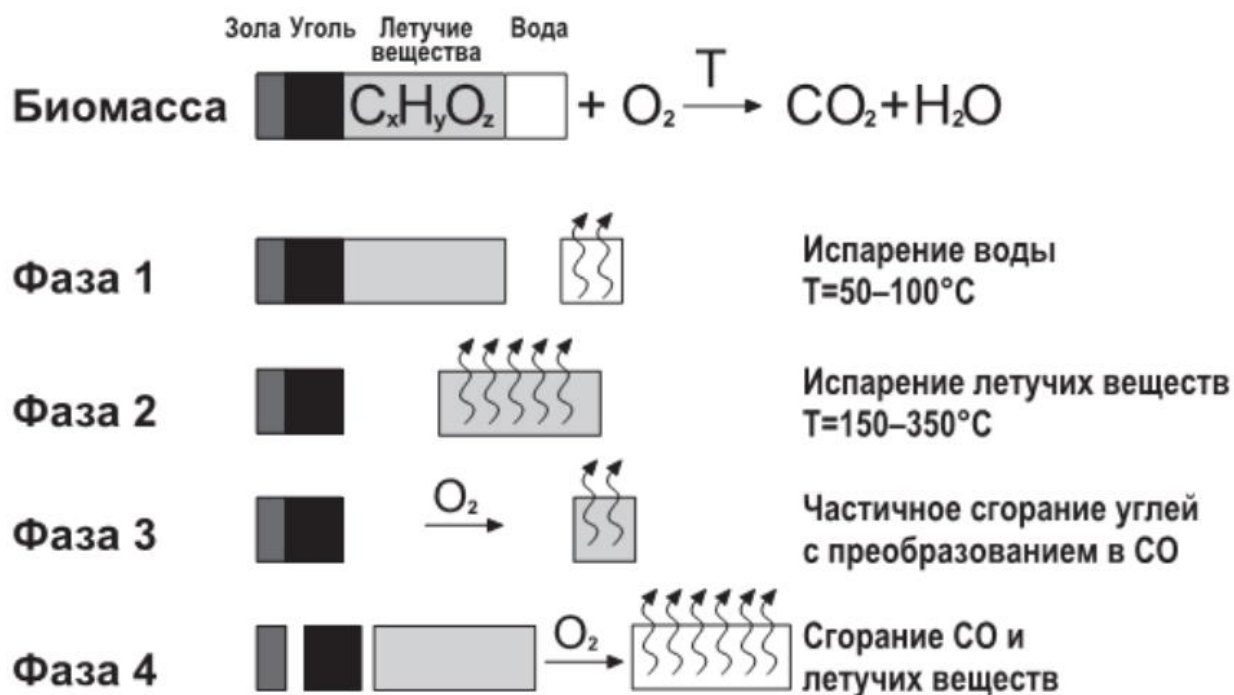


Рисунок 2 – Схема сжигания древесины

Выбросы, образующиеся при неполном сгорании ( $\text{CO}$ ,  $\text{C}_x\text{H}_y$ ,  $\text{O}_3$ ) могут быть вызваны [31]:

1. Неправильным смешением воздуха и топлива в топливной камере, в результате чего образуются локальные зоны с недостатком воздуха;
2. Недостаточным количеством кислорода;
3. Низкой температурой в зоне горения;
4. Недостаточным временем пребывания топлива в зоне горения;
5. Чрезмерно низкой концентрацией радикалов, наблюдающейся в отдельных случаях, например на последнем этапе сгорания при дозированном сжигании топлива.

Оптимизация этих переменных позволяет снизить уровни всех выбросов, вызываемых неполным сгоранием.

### **1.6. Состояние мировой биоэнергетики**

Современные технологии обеспечивают переработку некондиционной древесины и древесных отходов по следующим основным направлениям биоэнергетического использования: сжигание; производство улучшенного твердого топлива; газогенерация; биотехнологии; производство древесного угля; производство жидкого топлива и в энерготехнологических процессах. Биотопливо все шире используется для комбинированной выработки энергии, что является более эффективным подходом, чем раздельное производство тепловой и электрической энергии [32,33].

Так как выход древесного сырья на внутренний и внешний рынки энергии растет, то возникла такая актуальная проблема, как проведение экономической оценки возможных направлений энергетической переработки древесины. За рубежом биотопливо вполне успешно используется, так как создана эффективная и успешная инфраструктура производства, переработки, а также доставки товара конечному потребителю. Спрос на топливные гранулы велик. Прогнозируется, что к 2020 г. Европейские электростанции должны довести долю биомассы в объеме потребляемого

топлива до 20%. Европа потребляет 8,2 млн. т. биотоплива, а к 2020 г. рассчитывает нарастить объем потребления до 80-100 млн. т. Так как Российская Федерация имеет огромные территории, на которых находится четверть мировых лесных ресурсов, то появляется шанс перенять зарубежный опыт и занять достойное место на внешнем и внутреннем рынке древесного сырья.

Но существует такая проблема, что в Российской Федерации недостаточно условий для развития биоэнергетики в крупных масштабах. Поэтому она развивается в некоторых районах страны стихийно, без учета состояния внутреннего и внешнего рынков. Что создает огромную противоречивую ситуацию, потому что промышленные предприятия вынуждены развивать биоэнергетику с ориентацией на экспорт, а большинство муниципальных котельных продолжают сжигать традиционные виды топлива, пока в российских лесах из года в год остаются гнить миллионы кубометров лесных ресурсов.

Из чего можно заключить, что Российская Федерация имеет внушительный потенциал для развития биоэнергетики. С модернизацией и продвижением биоэнергетики улучшится санитарное состояние в лесах, начнется активное развитие малого предпринимательства и теплоснабжения муниципалитетов, поэтому в настоящее время очень важно и актуально проведение экономической оценки эффективности использования биомассы в качестве топлива [34].

Экологическая эффективность использования древесного биотоплива представляет вклад энергетического использования древесины в реализацию Киотского протокола с учетом характерных для Российской Федерации высоких энергетических затрат на одного человека в год на уровне 4,2 т. у. т. (тонн условного топлива) [35]. Анализ мирового опыта показывает, что эффективность преобразования энергии, получаемой при сжигании древесины с использованием передовых технологий, становится сравнимой с традиционными генераторами, работающими на ископаемом топливе,

использование древесного биотоплива представляется перспективным для проектов совместного осуществления в рамках «механизмов гибкости» Киотского протокола.

Потенциал всех древесных отходов в Российской Федерации практически не задействован, развитие производства древесного биотоплива осуществляется, практически за счет использования только отходов лесопиления [36]. В 2011 г. по данным Росстата, было направлено в переработку только 2,2 тысячи плотных кубометров лесосечных отходов. В то время как в Швеции потенциал древесного сырья для переработки в энергетических целях на 69% состоит из сучьев, вершинок, веток от рубок главного и промежуточного пользования. В Финляндии наибольший объем топливной щепы получают из порубочных остатков [37]. Эти обстоятельства позволяют сделать вывод о том, что в ближайшей перспективе основным сырьевым источником производства биотоплива из древесины будут отходы лесопиления.

В источниках [37, 38] авторами затрагивается проблема экономически эффективного развития биоэнергетики, которое определяется концентрацией древесной биомассы. Несомненно, в настоящий момент в некоторых частях Российской Федерации лесозаготовительное производство децентрализовано, из чего следует, что развитие биоэнергетики на территории страны необходимо. И оно будет возможным при создании разветвленной системы производства энергоносителей, а также комплексной в этом производстве системой хранения, транспортировки и продажи конечному потребителю.

В статье [39] рассматривается использование древесных отходов для производства электрической энергии в режиме мини-ТЭЦ, а также представлен проект модернизации системы электроснабжения и рассмотрены два варианта перевода электроснабжения на биотопливо.

В источнике [40] автор рассматривает перспективу использования биотоплива вместо мазута, в качестве примера рассматривает опыт перевода



котельной, использовавшей в качестве топлива привозной мазут на местное биотопливо – древесные отходы лесопиления.

В [41] рассматривается возможность использования отходов лесопиления (опилок) как сырья для изготовления древесно-цементного материала с микродобавкой аморфного диоксида кремния. Но затронутая проблема в данной статье требует решения ряда задач.

### **Выводы по обзору литературы**

При изучении современной технической литературы было получено большое количество информации о строении хвойной древесины и видах древесных отходов. Проведя анализ можно сделать вывод о том, что энергетические характеристики биомассы, полученной из отходов лесопиления и деревообработки, позволяют использовать её в качестве альтернативного вида топлива, но биомасса нуждается в предварительной подготовке. Поэтому далее был изучен процесс сушки, а также особенности сжигания древесной биомассы.

Наиболее эффективным и выгодным является искусственная сушка, но, несмотря на большое количество исследуемой литературы, четкие рекомендаций по подготовке и сушке древесной биомассы отсутствуют. Поэтому можно сделать такое заключение, что процесс влагоудаления из растительной биомассы изучен не до конца и требует дальнейших исследований.

Также можно сделать вывод о том, что древесное биотопливо более предпочтительно, с точки зрения загрязнения атмосферы, в сравнении с другими традиционными видами топлива, так как имеет практически нулевой эффект по выбросам парниковых газов и прежде всего диоксида углерода.

Ознакомившись с состоянием мировой энергетики в отрасли биотоплива, можно сказать, что потенциальный запас древесной биомассы на территории РФ огромен, а годовой объем прироста биомассы на Земле составляет 220 млрд. тонн, это говорит о том, что исследования и разработка

новых технологий использования биомассы являются перспективными и актуальными.

## **2 Экспериментальное исследование процесса влагоудаления из слоя лесного горючего материала на основе отходов лесопиления и деревообработки**

Цель работы: Экспериментальное исследование процессов влагоудаления из слоя лесного горючего материала в сушильной камере.

Задачи работы:

- 1) Подготовка образцов для исследования;
- 2) Измерение начальной массы образца с помощью лабораторных весов;
- 3) Установка с помощью терморегулятора необходимой температуры для эксперимента внутри сушильной установки;
- 4) Измерение и запись значений массы образца с интервалом в 10 минут после помещения в сушильный шкаф;
- 5) Построение графиков зависимости массовой скорости испарения жидкости от температуры нагрева и от времени;
- 6) Расчет погрешностей измерений, парциального давления и коэффициента аккомодации;
- 7) Анализ полученных результатов.

### **2.1 План эксперимента**

1. Подготавливаем экспериментальный образец биомассы;
2. Включаем сушильную камеру;
3. Устанавливаем с помощью терморегулятора нужную температуру внутри установки;
4. Навеску помещаем в сушильную камеру и начинаем отсчет времени;
5. Через каждые 600 секунд записываем значения массы образца;
6. Обработываем и анализируем полученные результаты.

*Примечание:* данный эксперимент проводится аналогично и не менее 3 раз для любых выбранных температур в печи в одном и том же выбранном интервале времени.

## 2.2 Описание экспериментальной установки



Рисунок 3 – Сушильный шкаф

В лаборатории для проведения эксперимента установлен сушильный шкаф, который имеет очень простую конструкцию и небольшие размеры. Основное предназначение это сушка и испытания различных материалов.

Сушильный шкаф состоит из рабочей камеры, её нагрев осуществляется с помощью проволочных нагревателей, которые размещены вокруг камеры нагрева. Используемые нагревательные панели обеспечивают равномерный нагрев поверхности, а также имеют достаточно хорошую теплопередачу.

Нужно отметить, что данный лабораторный сушильный шкаф имеет естественную циркуляцию. Вдобавок в нижней части рабочей камеры расположены вентиляционные каналы, которые осуществляют подачу

холодного воздуха внутрь рабочей камеры. Конструкция сушильного шкафа устроена так, что в верхней части рабочей камеры есть отверстия для устройства измерения температуры, а также отверстие для сброса паров влаги. Интенсивность вентиляции регулируется с помощью нижней вентиляционной заслонки.

Особенности сушильного шкафа:

- рабочая камера и полки из нержавеющей стали;
- естественная вентиляция рабочей камеры с регулирующей заслонкой;
- отверстия для сброса паров влаги;
- отверстия для установки термометра;
- тумблер включения нагрева.

Характеристики сушильного агрегата: напряжение – 220 В; частота – 50 Гц; ; сила тока – 6,8 А; рабочий диапазон температур – 40 – 200 °С; мощность – 4,5 кВт.

На рисунке 4 приведена принципиальная схема экспериментальной установки, которая была сделана с помощью программы Компас-3D.

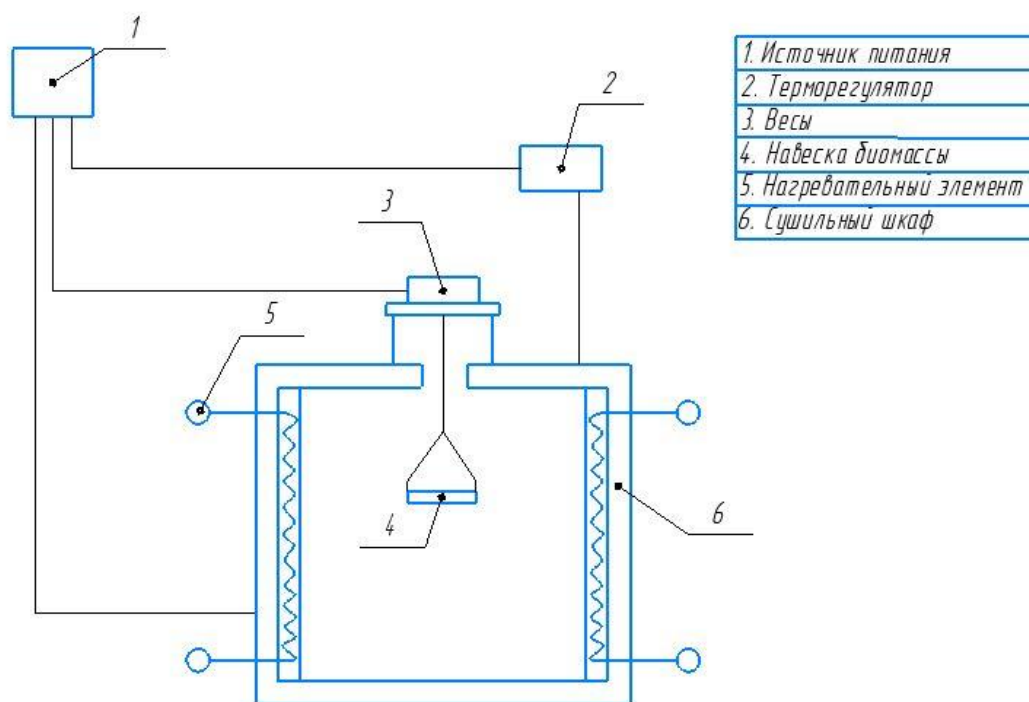


Рисунок 4 – Принципиальная схема экспериментальной установки

### 2.3 Образцы для проведения эксперимента

В эксперименте участвует два образца отходов лесопиления и деревообработки хвойных пород древесины (опилки и щепа).

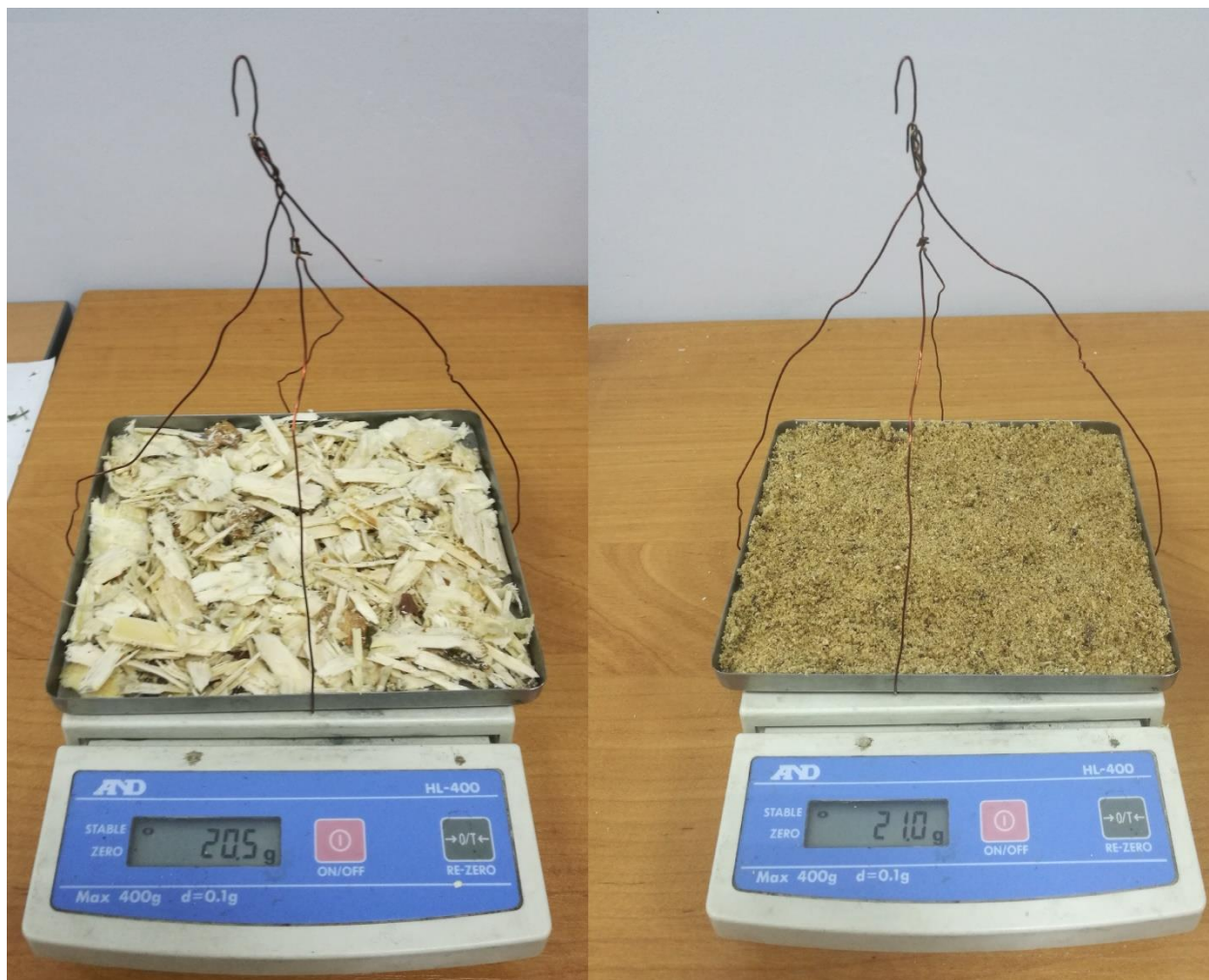


Рисунок 5 – Экспериментальные образцы (щепа – слева, опилки – справа)

Процесс испарения жидкости можно было считать законченным, если масса образца не изменялась в течение 30 минут.

### 3 Результаты экспериментального исследования массовой скорости испарения жидкостей

Результаты расчёта массовой скорости испарения жидкости приведены ниже. В процессе выполнения научной работы было проведено экспериментальное исследование массовой скорости испарения жидкости для двух образцов отходов лесопиления хвойных пород деревьев: щепы и опилки.

Таблица 4 – Результаты расчета для опилок при 60 °С 1 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 20,4            | 0,0204           | 0,0009                | 0             | $7,17 \cdot 10^{-5}$  | 0,6054    |
| 19,5            | 0,0195           | 0,00095               | 600           | $7,57 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 18,55           | 0,01855          | 0,001                 | 1200          | $7,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 17,55           | 0,01755          | 0,00085               | 1800          | $6,77 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 16,7            | 0,0167           | 0,001                 | 2400          | $7,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,7            | 0,0157           | 0,001                 | 3000          | $7,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 14,7            | 0,0147           | 0,0008                | 3600          | $6,37 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 13,9            | 0,0139           | 0,0008                | 4200          | $6,37 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 13,1            | 0,0131           | 0,00075               | 4800          | $5,97 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 12,35           | 0,01235          | 0,00065               | 5400          | $5,18 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,7            | 0,0117           | 0,00065               | 6000          | $5,18 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,05           | 0,01105          | 0,0006                | 6600          | $4,78 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,45           | 0,01045          | 0,0005                | 7200          | $3,98 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,95            | 0,00995          | 0,00045               | 7800          | $3,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,5             | 0,0095           | 0,0003                | 8400          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,2             | 0,0092           | 0,0004                | 9000          | $3,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,8             | 0,0088           | 0,0002                | 9600          | $1,59 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,6             | 0,0086           | 0,00015               | 10200         | $1,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,45            | 0,00845          | 0,00015               | 10800         | $1,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,3             | 0,0083           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 11400         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,25            | 0,00825          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 12000         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,2             | 0,0082           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 12600         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,15            | 0,00815          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 13200         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,1             | 0,0081           | 0                     | 13800         | 0   |           |
| 8,1             | 0,0081           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 14400         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,05            | 0,00805          | 0                     | 15000         | 0   |           |
| 8,05            | 0,00805          | 0                     | 15600         | 0   |           |
| 8,05            | 0,00805          | 0                     | 16200         | 0   |           |

Таблица 5 – Результаты расчета для опилок при 60 °С 2 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 21,05           | 0,02105          | 0,00245               | 0             | 0,000195  | 0,5748    |
| 18,6            | 0,0186           | 0,00115               | 600           | $9,16 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 17,45           | 0,01745          | 0,0011                | 1200          | $8,76 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 16,35           | 0,01635          | 0,00095               | 1800          | $7,57 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,4            | 0,0154           | 0,00095               | 2400          | $7,57 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 14,45           | 0,01445          | 0,0009                | 3000          | $7,17 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 13,55           | 0,01355          | 0,00085               | 3600          | $6,77 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 12,7            | 0,0127           | 0,00075               | 4200          | $5,97 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,95           | 0,01195          | 0,00065               | 4800          | $5,18 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,3            | 0,0113           | 0,00055               | 5400          | $4,38 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,75           | 0,01075          | 0,00045               | 6000          | $3,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,3            | 0,0103           | 0,00035               | 6600          | $2,79 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,95            | 0,00995          | 0,0003                | 7200          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,65            | 0,00965          | 0,00015               | 7800          | $1,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,5             | 0,0095           | 0,00015               | 8400          | $1,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,35            | 0,00935          | 0,0001                | 9000          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,25            | 0,00925          | $1 \cdot 10^{-4}$     | 9600          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,15            | 0,00915          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 10200         | $3,38 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,1             | 0,0091           | $1 \cdot 10^{-4}$     | 10800         | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9               | 0,009            | 0                     | 11400         | 0   |           |
| 9               | 0,009            | $5 \cdot 10^{-5}$     | 12000         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,95            | 0,00895          | 0                     | 12600         | 0   |           |
| 8,95            | 0,00895          | 0                     | 13200         | 0   |           |
| 8,95            | 0,00895          | 0                     | 13800         | 0   |           |

Таблица 6 – Результаты расчета для опилок при 60 °С 3 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 22              | 0,022            | 0,0015                | 0             | 0,000119  | 0,5682    |
| 20,5            | 0,0205           | 0,00125               | 600           | $9,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 19,25           | 0,01925          | 0,001                 | 1200          | $7,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 18,25           | 0,01825          | 0,0009                | 1800          | $7,17 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 17,35           | 0,01735          | 0,00085               | 2400          | $6,77 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 16,5            | 0,0165           | 0,0008                | 3000          | $6,37 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,7            | 0,0157           | 0,00085               | 3600          | $6,77 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 14,85           | 0,01485          | 0,00075               | 4200          | $5,97 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 14,1            | 0,0141           | 0,00075               | 4800          | $5,97 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 13,35           | 0,01335          | 0,0006                | 5400          | $4,78 \cdot 10^{-5}$  |           |

Продолжение таблицы 6

|       |         |                   |       |                      |  |
|-------|---------|-------------------|-------|----------------------|--|
| 12,75 | 0,01275 | 0,00055           | 6000  | $4,38 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 12,2  | 0,0122  | 0,0005            | 6600  | $3,98 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 11,7  | 0,0117  | 0,0004            | 7200  | $3,19 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 11,3  | 0,0113  | 0,00035           | 7800  | $2,79 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 10,95 | 0,01095 | 0,0005            | 8400  | $3,98 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 10,45 | 0,01045 | 0,00025           | 9000  | $1,99 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 10,2  | 0,0102  | 0,0002            | 9600  | $1,59 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 10    | 0,01    | $1 \cdot 10^{-4}$ | 10200 | $7,96 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 9,9   | 0,0099  | 0,00015           | 10800 | $1,19 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 9,75  | 0,00975 | $1 \cdot 10^{-4}$ | 11400 | $7,96 \cdot 10^{-6}$ |  |
| 9,65  | 0,00965 | $5 \cdot 10^{-5}$ | 12000 | $3,98 \cdot 10^{-6}$ |  |
| 9,6   | 0,0096  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 12600 | $7,96 \cdot 10^{-6}$ |  |
| 9,5   | 0,0095  | 0                 | 13200 | 0                    |  |
| 9,5   | 0,0095  | 0                 | 13800 | 0                    |  |
| 9,5   | 0,0095  | 0                 | 14400 | 0                    |  |

Таблица 7 – Результаты расчета для опилок при 80 °С 1 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 21,65           | 0,02165          | 0,00155               | 0             | 0,000123  | 0,5751    |
| 20,1            | 0,0201           | 0,00155               | 600           | 0,000123  |           |
| 18,55           | 0,01855          | 0,00155               | 1200          | 0,000123  |           |
| 17              | 0,017            | 0,0017                | 1800          | 0,000135  |           |
| 15,3            | 0,0153           | 0,0013                | 2400          | 0,000104  |           |
| 14              | 0,014            | 0,0011                | 3000          | $8,76 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 12,9            | 0,0129           | 0,0009                | 3600          | $7,17 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 12              | 0,012            | 0,0007                | 4200          | $5,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,3            | 0,0113           | 0,00055               | 4800          | $4,38 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,75           | 0,01075          | 0,00045               | 5400          | $3,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,3            | 0,0103           | 0,00035               | 6000          | $2,79 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,95            | 0,00995          | 0,00025               | 6600          | $1,99 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,7             | 0,0097           | 0,00015               | 7200          | $1,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,55            | 0,00955          | 0,0001                | 7800          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,45            | 0,00945          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 8400          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,4             | 0,0094           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 9000          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,35            | 0,00935          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 9600          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,3             | 0,0093           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 10200         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,25            | 0,00925          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 10800         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,2             | 0,0092           | 0                     | 11400         | 0   |           |
| 9,2             | 0,0092           | 0                     | 12000         | 0   |           |



Таблица 8 – Результаты расчета для опилок при 80 °С 2 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 20,15           | 0,02015          | 0,0019                | 0             | 0,000151  | 0,5906    |
| 18,25           | 0,01825          | 0,00195               | 600           | 0,000155  |           |
| 16,3            | 0,0163           | 0,0015                | 1200          | 0,000119  |           |
| 14,8            | 0,0148           | 0,00135               | 1800          | 0,000108  |           |
| 13,45           | 0,01345          | 0,00125               | 2400          | $9,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 12,2            | 0,0122           | 0,00115               | 3000          | $9,16 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,05           | 0,01105          | 0,00095               | 3600          | $7,57 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,1            | 0,0101           | 0,0007                | 4200          | $5,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,4             | 0,0094           | 0,0005                | 4800          | $3,98 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,9             | 0,0089           | 0,0003                | 5400          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,6             | 0,0086           | 0,0002                | 6000          | $1,59 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,4             | 0,0084           | 0,0001                | 6600          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,3             | 0,0083           | 0                     | 7200          | 0   |           |
| 8,3             | 0,0083           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 7800          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,25            | 0,00825          | 0                     | 8400          | 0   |           |
| 8,25            | 0,00825          | 0                     | 9000          | 0   |           |
| 8,25            | 0,00825          | 0                     | 9600          | 0   |           |

Таблица 9 – Результаты расчета для опилок при 80 °С 3 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 20,3            | 0,0203           | 0,0021                | 0             | 0,000167  | 0,5665    |
| 18,2            | 0,0182           | 0,0016                | 600           | 0,000127  |           |
| 16,6            | 0,0166           | 0,0014                | 1200          | 0,000112  |           |
| 15,2            | 0,0152           | 0,00135               | 1800          | 0,000108  |           |
| 13,85           | 0,01385          | 0,0012                | 2400          | $9,56 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 12,65           | 0,01265          | 0,001                 | 3000          | $7,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,65           | 0,01165          | 0,0009                | 3600          | $7,17 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,75           | 0,01075          | 0,0007                | 4200          | $5,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,05           | 0,01005          | 0,0005                | 4800          | $3,98 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,55            | 0,00955          | 0,0003                | 5400          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,25            | 0,00925          | 0,00025               | 6000          | $1,99 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9               | 0,009            | 0,0001                | 6600          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,9             | 0,0089           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 7200          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,85            | 0,00885          | 0                     | 7800          | 0   |           |
| 8,85            | 0,00885          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 8400          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,8             | 0,0088           | 0                     | 9000          | 0   |           |
| 8,8             | 0,0088           | 0                     | 9600          | 0   |           |
| 8,8             | 0,0088           | 0                     | 10200         | 0   |           |

Таблица 10 – Результаты расчета для опилок при 100 °С 1 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 21,15           | 0,02115          | 0,00295               | 0             | 0,000235  | 0,5886    |
| 18,2            | 0,0182           | 0,0029                | 600           | 0,000231  |           |
| 15,3            | 0,0153           | 0,00255               | 1200          | 0,000203  |           |
| 12,75           | 0,01275          | 0,0019                | 1800          | 0,000151  |           |
| 10,85           | 0,01085          | 0,0012                | 2400          | $9,56 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,65            | 0,00965          | 0,0008                | 3000          | $6,37 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,85            | 0,00885          | $1 \cdot 10^{-4}$     | 3600          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,75            | 0,00875          | 0                     | 4200          | 0   |           |
| 8,75            | 0,00875          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 4800          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,7             | 0,0087           | 0                     | 5400          | 0   |           |
| 8,7             | 0,0087           | 0                     | 6000          | 0   |           |
| 8,7             | 0,0087           | 0                     | 6600          | 0   |           |

Таблица 11 – Результаты расчета для опилок при 100 °С 2 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 22,05           | 0,02205          | 0,00255               | 0             | 0,000203  | 0,5941    |
| 19,5            | 0,0195           | 0,00245               | 600           | 0,000195  |           |
| 17,05           | 0,01705          | 0,0021                | 1200          | 0,000167  |           |
| 14,95           | 0,01495          | 0,00195               | 1800          | 0,000155  |           |
| 13              | 0,013            | 0,00165               | 2400          | 0,000131  |           |
| 11,35           | 0,01135          | 0,00125               | 3000          | $9,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,1            | 0,0101           | 0,00065               | 3600          | $5,18 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,45            | 0,00945          | 0,0003                | 4200          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,15            | 0,00915          | $1 \cdot 10^{-4}$     | 4800          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9,05            | 0,00905          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 5400          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 9               | 0,009            | 0                     | 6000          | 0   |           |
| 9               | 0,009            | $5 \cdot 10^{-5}$     | 6600          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,95            | 0,00895          | 0                     | 7200          | 0   |           |
| 8,95            | 0,00895          | 0                     | 7800          | 0   |           |
| 8,95            | 0,00895          | 0                     | 8400          | 0   |           |

Таблица 12 – Результаты расчета для опилок при 100 °С 3 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 20,35           | 0,02035          | 0,00235               | 0             | 0,000187  | 0,602     |
| 18              | 0,018            | 0,00255               | 600           | 0,000203  |           |
| 15,45           | 0,01545          | 0,00215               | 1200          | 0,000171  |           |
| 13,3            | 0,0133           | 0,0018                | 1800          | 0,000143  |           |
| 11,5            | 0,0115           | 0,00125               | 2400          | $9,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 10,25           | 0,01025          | 0,0009                | 3000          | $7,17 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 9,35            | 0,00935          | 0,0006                | 3600          | $4,78 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,75            | 0,00875          | 0,0003                | 4200          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 8,45            | 0,00845          | $1 \cdot 10^{-4}$     | 4800          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,35            | 0,00835          | $1 \cdot 10^{-4}$     | 5400          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,25            | 0,00825          | 0,00015               | 6000          | $1,19 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 8,1             | 0,0081           | 0                     | 6600          | 0   |           |
| 8,1             | 0,0081           | 0                     | 7200          | 0   |           |
| 8,1             | 0,0081           | 0                     | 7800          | 0   |           |

Таблица 13 – Результаты расчета для опилок при 120 °С 1 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 19,85           | 0,01985          | 0,00325               | 0             | 0,000259  | 0,6247    |
| 16,6            | 0,0166           | 0,00355               | 600           | 0,000283  |           |
| 13,05           | 0,01305          | 0,00305               | 1200          | 0,000243  |           |
| 10              | 0,01             | 0,00155               | 1800          | 0,000123  |           |
| 8,45            | 0,00845          | 0,00055               | 2400          | $4,38 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 7,9             | 0,0079           | 0,0002                | 3000          | $1,59 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 7,7             | 0,0077           | 0,00015               | 3600          | $1,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 7,55            | 0,00755          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 4200          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 7,5             | 0,0075           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 4800          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 7,45            | 0,00745          | 0                     | 5400          | 0   |           |
| 7,45            | 0,00745          | 0                     | 6000          | 0   |           |
| 7,45            | 0,00745          | 0                     | 6600          | 0   |           |

Таблица 14 – Результаты расчета для опилок при 120 °С 2 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 19,05           | 0,01905          | 0,00385               | 0             | 0,000307  | 0,6194    |
| 15,2            | 0,0152           | 0,004                 | 600           | 0,000319  |           |
| 11,2            | 0,0112           | 0,0026                | 1200          | 0,000207  |           |
| 8,6             | 0,0086           | 0,0009                | 1800          | $7,17 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 7,7             | 0,0077           | 0,0003                | 2400          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 7,4             | 0,0074           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 3000          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 7,35            | 0,00735          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 3600          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 7,3             | 0,0073           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 4200          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 7,25            | 0,00725          | 0                     | 4800          | 0   |           |
| 7,25            | 0,00725          | 0                     | 5400          | 0   |           |
| 7,25            | 0,00725          | 0                     | 6000          | 0   |           |
| 7,25            | 0,00725          | 0                     | 6600          | 0   |           |

Таблица 15 – Результаты расчета для опилок при 120 °С 3 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 19,25           | 0,01925          | 0,0041                | 0             | 0,000327  | 0,6156    |
| 15,15           | 0,01515          | 0,0038                | 600           | 0,000303  |           |
| 11,35           | 0,01135          | 0,0026                | 1200          | 0,000207  |           |
| 8,75            | 0,00875          | 0,0011                | 1800          | $8,76 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 7,65            | 0,00765          | 0,0001                | 2400          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 7,55            | 0,00755          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 3000          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 7,5             | 0,0075           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 3600          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 7,45            | 0,00745          | 0                     | 4200          | 0   |           |
| 7,45            | 0,00745          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 4800          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 7,4             | 0,0074           | 0                     | 5400          | 0   |           |
| 7,4             | 0,0074           | 0                     | 6000          | 0   |           |
| 7,4             | 0,0074           | 0                     | 6600          | 0   |           |

В таблицах 4-6 приведены значения для 3 серий экспериментов (опилки) при 60 °С. В таблицах 7-9 приведены значения для 3 серий экспериментов (опилки) при 80 °С. В таблицах 10-12 приведены значения для 3 серий экспериментов (опилки) при 100 °С. В таблицах 13-15 приведены значения для 3 серий экспериментов (опилки) при 120 °С.

В таблицах 16-18 приведены значения для 3 серий экспериментов (щепа) при 60 °С. В таблицах 19-21 приведены значения для 3 серий экспериментов (щепа) при 80 °С. В таблицах 22-24 приведены значения для 3 серий экспериментов (щепа) при 100 °С. В таблицах 25-27 приведены значения для 3 серий экспериментов (щепа) при 120 °С.

Таблица 16 – Результаты расчета для щепы при 60 °С 1 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\phi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|--------|
| 20,15           | 0,02015          | 0,00095               | 0             | $7,57 \cdot 10^{-5}$  | 0,449  |
| 19,2            | 0,0192           | 0,00105               | 600           | $8,36 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 18,15           | 0,01815          | 0,00085               | 1200          | $6,77 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 17,3            | 0,0173           | 0,00075               | 1800          | $5,97 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 16,55           | 0,01655          | 0,00075               | 2400          | $5,97 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 15,8            | 0,0158           | 0,00075               | 3000          | $5,97 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 15,05           | 0,01505          | 0,0007                | 3600          | $5,58 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 14,35           | 0,01435          | 0,00065               | 4200          | $5,18 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 13,7            | 0,0137           | 0,00055               | 4800          | $4,38 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 13,15           | 0,01315          | 0,0005                | 5400          | $3,98 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 12,65           | 0,01265          | 0,0004                | 6000          | $3,19 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 12,25           | 0,01225          | 0,00035               | 6600          | $2,79 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 11,9            | 0,0119           | 0,00025               | 7200          | $1,99 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 11,65           | 0,01165          | 0,0002                | 7800          | $1,59 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 11,45           | 0,01145          | $1 \cdot 10^{-4}$     | 8400          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |        |
| 11,35           | 0,01135          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 9000          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |        |
| 11,3            | 0,0113           | 0,0001                | 9600          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |        |
| 11,2            | 0,0112           | 0                     | 10200         | 0   |        |
| 11,2            | 0,0112           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 10800         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |        |
| 11,15           | 0,01115          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 11400         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |        |
| 11,1            | 0,0111           | 0                     | 12000         | 0   |        |
| 11,1            | 0,0111           | 0                     | 12600         | 0   |        |
| 11,1            | 0,0111           | 0                     | 13200         | 0   |        |

Таблица 17 – Результаты расчета для щепы при 60 °С 2 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\phi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|--------|
| 20,4            | 0,0204           | 0,0011                | 0             | $8,76 \cdot 10^{-5}$  | 0,399  |
| 19,3            | 0,0193           | 0,00095               | 600           | $7,57 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 18,35           | 0,01835          | 0,0008                | 1200          | $6,37 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 17,55           | 0,01755          | 0,0008                | 1800          | $6,37 \cdot 10^{-5}$  |        |

Продолжение таблицы 17

|       |         |                   |       |                      |  |
|-------|---------|-------------------|-------|----------------------|--|
| 16,75 | 0,01675 | 0,0007            | 2400  | $5,58 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 16,05 | 0,01605 | 0,0007            | 3000  | $5,58 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 15,35 | 0,01535 | 0,00055           | 3600  | $4,38 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 14,8  | 0,0148  | 0,00045           | 4200  | $3,58 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 14,35 | 0,01435 | 0,00055           | 4800  | $4,38 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 13,8  | 0,0138  | 0,0004            | 5400  | $3,19 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 13,4  | 0,0134  | 0,0003            | 6000  | $2,39 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 13,1  | 0,0131  | 0,00025           | 6600  | $1,99 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 12,85 | 0,01285 | 0,00015           | 7200  | $1,19 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 12,7  | 0,0127  | 0,00015           | 7800  | $1,19 \cdot 10^{-5}$ |  |
| 12,55 | 0,01255 | 0,0001            | 8400  | $7,96 \cdot 10^{-6}$ |  |
| 12,45 | 0,01245 | $1 \cdot 10^{-4}$ | 9000  | $7,96 \cdot 10^{-6}$ |  |
| 12,35 | 0,01235 | $5 \cdot 10^{-5}$ | 9600  | $3,98 \cdot 10^{-6}$ |  |
| 12,3  | 0,0123  | $5 \cdot 10^{-5}$ | 10200 | $3,98 \cdot 10^{-6}$ |  |
| 12,25 | 0,01225 | 0                 | 10800 | 0                    |  |
| 12,25 | 0,01225 | 0                 | 11400 | 0                    |  |
| 12,25 | 0,01225 | 0                 | 12000 | 0                    |  |

Таблица 18 – Результаты расчета для щепы при 60 °С 3 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 19,95           | 0,01995          | 0,00085               | 0             | $6,77 \cdot 10^{-5}$  | 0,313     |
| 19,1            | 0,0191           | 0,0007                | 600           | $5,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 18,4            | 0,0184           | 0,00065               | 1200          | $5,18 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 17,75           | 0,01775          | 0,00055               | 1800          | $4,38 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 17,2            | 0,0172           | 0,0005                | 2400          | $3,98 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 16,7            | 0,0167           | 0,0005                | 3000          | $3,98 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 16,2            | 0,0162           | 0,00045               | 3600          | $3,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,75           | 0,01575          | 0,0004                | 4200          | $3,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,35           | 0,01535          | 0,00035               | 4800          | $2,79 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15              | 0,015            | 0,0003                | 5400          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 14,7            | 0,0147           | 0,0002                | 6000          | $1,59 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 14,5            | 0,0145           | 0,0002                | 6600          | $1,59 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 14,3            | 0,0143           | 0,00015               | 7200          | $1,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 14,15           | 0,01415          | $1 \cdot 10^{-4}$     | 7800          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 14,05           | 0,01405          | 0,0001                | 8400          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 13,95           | 0,01395          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 9000          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 13,9            | 0,0139           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 9600          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 13,85           | 0,01385          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 10200         | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 13,8            | 0,0138           | 0,0001                | 10800         | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |

Продолжение таблицы 18

|      |        |   |       |   |  |
|------|--------|---|-------|---|--|
| 13,7 | 0,0137 | 0 | 11400 | 0 |  |
| 13,7 | 0,0137 | 0 | 12000 | 0 |  |
| 13,7 | 0,0137 | 0 | 12600 | 0 |  |

Таблица 19 – Результаты расчета для щепы при 80 °С 1 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 20,4            | 0,0204           | 0,0008                | 0             | $6,37 \cdot 10^{-5}$  | 0,4436    |
| 19,6            | 0,0196           | 0,00125               | 600           | $9,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 18,35           | 0,01835          | 0,00135               | 1200          | 0,000108  |           |
| 17              | 0,017            | 0,0012                | 1800          | $9,56 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,8            | 0,0158           | 0,00105               | 2400          | $8,36 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 14,75           | 0,01475          | 0,0009                | 3000          | $7,17 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 13,85           | 0,01385          | 0,00075               | 3600          | $5,97 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 13,1            | 0,0131           | 0,0006                | 4200          | $4,78 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 12,5            | 0,0125           | 0,0004                | 4800          | $3,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 12,1            | 0,0121           | 0,00035               | 5400          | $2,79 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,75           | 0,01175          | 0,0002                | 6000          | $1,59 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,55           | 0,01155          | 0,0001                | 6600          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 11,45           | 0,01145          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 7200          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 11,4            | 0,0114           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 7800          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 11,35           | 0,01135          | 0                     | 8400          | 0   |           |
| 11,35           | 0,01135          | 0                     | 9000          | 0   |           |
| 11,35           | 0,01135          | 0                     | 9600          | 0   |           |

Таблица 20 – Результаты расчета для щепы при 80 °С 2 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 20,85           | 0,02085          | 0,0014                | 0             | 0,000112  | 0,287     |
| 19,45           | 0,01945          | 0,00105               | 600           | $8,36 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 18,4            | 0,0184           | 0,00095               | 1200          | $7,57 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 17,45           | 0,01745          | 0,00065               | 1800          | $5,18 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 16,8            | 0,0168           | 0,0006                | 2400          | $4,78 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 16,2            | 0,0162           | 0,00045               | 3000          | $3,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,75           | 0,01575          | 0,0003                | 3600          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,45           | 0,01545          | 0,00025               | 4200          | $1,99 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,2            | 0,0152           | $1 \cdot 10^{-4}$     | 4800          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 15,1            | 0,0151           | 0,0001                | 5400          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 15              | 0,015            | $5 \cdot 10^{-5}$     | 6000          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 14,95           | 0,01495          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 6600          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |

Продолжение таблицы 20

|       |         |                   |      |                      |  |
|-------|---------|-------------------|------|----------------------|--|
| 14,9  | 0,0149  | 0                 | 7200 | 0                    |  |
| 14,9  | 0,0149  | $5 \cdot 10^{-5}$ | 7800 | $3,98 \cdot 10^{-6}$ |  |
| 14,85 | 0,01485 | 0                 | 8400 | 0                    |  |
| 14,85 | 0,01485 | 0                 | 9000 | 0                    |  |
| 14,85 | 0,01485 | 0                 | 9600 | 0                    |  |

Таблица 21 – Результаты расчета для щепы при 80 °С 3 серия

| $m_0$ , г | $m_0$ , кг | $\Delta m$ , кг   | t, с | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------|------------|-------------------|------|---|-----------|
| 20,7      | 0,0207     | 0,0015            | 0    | 0,000119  | 0,273     |
| 19,2      | 0,0192     | 0,00125           | 600  | $9,96 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 17,95     | 0,01795    | 0,00095           | 1200 | $7,57 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 17        | 0,017      | 0,0007            | 1800 | $5,58 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 16,3      | 0,0163     | 0,0005            | 2400 | $3,98 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,8      | 0,0158     | 0,0003            | 3000 | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,5      | 0,0155     | 0,0002            | 3600 | $1,59 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 15,3      | 0,0153     | 0,0001            | 4200 | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 15,2      | 0,0152     | $5 \cdot 10^{-5}$ | 4800 | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 15,15     | 0,01515    | $5 \cdot 10^{-5}$ | 5400 | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 15,1      | 0,0151     | 0                 | 6000 | 0   |           |
| 15,1      | 0,0151     | $5 \cdot 10^{-5}$ | 6600 | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 15,05     | 0,01505    | 0                 | 7200 | 0   |           |
| 15,05     | 0,01505    | 0                 | 7800 | 0   |           |
| 15,05     | 0,01505    | 0                 | 8400 | 0   |           |

Таблица 22 – Результаты расчета для щепы при 100 °С 1 серия

| $m_0$ , г | $m_0$ , кг | $\Delta m$ , кг   | t, с | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------|------------|-------------------|------|---|-----------|
| 20,3      | 0,0203     | 0,0022            | 0    | 0,000175  | 0,458     |
| 18,1      | 0,0181     | 0,00245           | 600  | 0,000195  |           |
| 15,65     | 0,01565    | 0,0018            | 1200 | 0,000143  |           |
| 13,85     | 0,01385    | 0,0014            | 1800 | 0,000112  |           |
| 12,45     | 0,01245    | 0,00085           | 2400 | $6,77 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,6      | 0,0116     | 0,0004            | 3000 | $3,19 \cdot 10^{-5}$  |           |
| 11,2      | 0,0112     | $1 \cdot 10^{-4}$ | 3600 | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 11,1      | 0,0111     | $5 \cdot 10^{-5}$ | 4200 | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 11,05     | 0,01105    | $5 \cdot 10^{-5}$ | 4800 | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |           |
| 11        | 0,011      | 0                 | 5400 | 0   |           |
| 11        | 0,011      | 0                 | 6000 | 0   |           |
| 11        | 0,011      | 0                 | 6600 | 0   |           |



Таблица 23 – Результаты расчета для щепы при 100 °С 2 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\phi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|--------|
| 20,5            | 0,0205           | 0,00245               | 0             | 0,000195  | 0,3658 |
| 18,05           | 0,01805          | 0,00185               | 600           | 0,000417  |        |
| 16,2            | 0,0162           | 0,0014                | 1200          | 0,000112  |        |
| 14,8            | 0,0148           | 0,0009                | 1800          | $7,17 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 13,9            | 0,0139           | 0,0005                | 2400          | $3,98 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 13,4            | 0,0134           | 0,00025               | 3000          | $1,99 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 13,15           | 0,01315          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 3600          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |        |
| 13,1            | 0,0131           | $5 \cdot 10^{-5}$     | 4200          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |        |
| 13,05           | 0,01305          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 4800          | $3,98 \cdot 10^{-6}$  |        |
| 13              | 0,013            | 0                     | 5400          | 0   |        |
| 13              | 0,013            | 0                     | 6000          | 0   |        |
| 13              | 0,013            | 0                     | 6600          | 0   |        |

Таблица 24 – Результаты расчета для щепы при 100 °С 3 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\phi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|--------|
| 20,8            | 0,0208           | 0,00215               | 0             | 0,000171  | 0,377  |
| 18,65           | 0,01865          | 0,00205               | 600           | 0,000163  |        |
| 16,6            | 0,0166           | 0,0015                | 1200          | 0,000119  |        |
| 15,1            | 0,0151           | 0,001                 | 1800          | $7,96 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 14,1            | 0,0141           | 0,0006                | 2400          | $4,78 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 13,5            | 0,0135           | 0,0003                | 3000          | $2,39 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 13,2            | 0,0132           | 0,00015               | 3600          | $1,19 \cdot 10^{-5}$  |        |
| 13,05           | 0,01305          | 0,0001                | 4200          | $7,96 \cdot 10^{-6}$  |        |
| 12,95           | 0,01295          | 0                     | 4800          | 0   |        |
| 12,95           | 0,01295          | 0                     | 5400          | 0   |        |
| 12,95           | 0,01295          | 0                     | 6000          | 0   |        |

Таблица 25 – Результаты расчета для щепы при 120 °С 1 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\phi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|--------|
| 20,3            | 0,0203           | 0,00245               | 0             | 0,0002  | 0,522  |
| 17,85           | 0,01785          | 0,00365               | 600           | 0,00029   |        |
| 14,2            | 0,0142           | 0,0027                | 1200          | 0,00022   |        |
| 11,5            | 0,0115           | 0,00135               | 1800          | 0,00011   |        |
| 10,15           | 0,01015          | 0,0004                | 2400          | $3,2 \cdot 10^{-5}$   |        |
| 9,75            | 0,00975          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 3000          | $4 \cdot 10^{-6}$   |        |
| 9,7             | 0,0097           | 0                     | 3600          | 0   |        |
| 9,7             | 0,0097           | 0                     | 4200          | 0   |        |
| 9,7             | 0,0097           | 0                     | 4800          | 0   |        |

Таблица 26 – Результаты расчета для щепы при 120 °С 2 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 20,5            | 0,0205           | 0,00205               | 0             | 0,00016   | 0,429     |
| 18,45           | 0,01845          | 0,0028                | 600           | 0,00022   |           |
| 15,65           | 0,01565          | 0,0019                | 1200          | 0,00015   |           |
| 13,75           | 0,01375          | 0,0011                | 1800          | $8,8 \cdot 10^{-5}$   |           |
| 12,65           | 0,01265          | 0,0005                | 2400          | $4 \cdot 10^{-5}$   |           |
| 12,15           | 0,01215          | 0,00025               | 3000          | $2 \cdot 10^{-5}$   |           |
| 11,9            | 0,0119           | 0,00015               | 3600          | $1,2 \cdot 10^{-5}$   |           |
| 11,75           | 0,01175          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 4200          | $4 \cdot 10^{-6}$   |           |
| 11,7            | 0,0117           | 0                     | 4800          | 0   |           |
| 11,7            | 0,0117           | 0                     | 5400          | 0   |           |
| 11,7            | 0,0117           | 0                     | 6000          | 0   |           |

Таблица 27 – Результаты расчета для щепы при 120 °С 3 серия

| $m_0, \text{г}$ | $m_0, \text{кг}$ | $\Delta m, \text{кг}$ | $t, \text{с}$ | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ | $\varphi$ |
|-----------------|------------------|-----------------------|---------------|---|-----------|
| 20,05           | 0,02005          | 0,0025                | 0             | 0,0002  | 0,3017    |
| 17,55           | 0,01755          | 0,0018                | 600           | 0,00014   |           |
| 15,75           | 0,01575          | 0,00095               | 1200          | $7,6 \cdot 10^{-5}$   |           |
| 14,8            | 0,0148           | 0,00045               | 1800          | $3,6 \cdot 10^{-5}$   |           |
| 14,35           | 0,01435          | 0,0002                | 2400          | $1,6 \cdot 10^{-5}$   |           |
| 14,15           | 0,01415          | $1 \cdot 10^{-4}$     | 3000          | $8 \cdot 10^{-6}$   |           |
| 14,05           | 0,01405          | $5 \cdot 10^{-5}$     | 3600          | $4 \cdot 10^{-6}$   |           |
| 14              | 0,014            | 0                     | 4200          | 0   |           |
| 14              | 0,014            | 0                     | 4800          | 0   |           |
| 14              | 0,014            | 0                     | 5400          | 0   |           |

$$\varphi = \frac{m_{\text{н}} - m_{\text{к}}}{m_{\text{н}}};$$

$$W_{\text{исп}} = \frac{\Delta m}{S \cdot t}.$$

### 3.1 Результаты расчёта погрешности измерений

Для обработки результатов измерений воспользуемся следующим алгоритмом и сведём полученные результаты в таблицы.

1) Найдём среднее арифметическое значение результатов измерения:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{n},$$

где  $x_1, x_2, x_3$  — значения измерений серий экспериментов;

$n$  — количество измерений.

2) Найдём среднюю квадратичную погрешность отдельного результата при 3 измерениях (погрешность метода измерений):

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1}}.$$

3) Найдём относительное уклонение «подозрительного» измерения, выраженное в долях  $S_n$ :

$$v_k = \left| \frac{\bar{x} - x_k}{S_n} \right|.$$

4) Находим значения  $v_{\min}, v_{\max}$  по известному количеству измерений используя приложение 4 в учебном пособии В.А. Архипов, А.П. Березиков «Основы теории инженерно-физического эксперимента»:

$$n = 3; v_{\min} = 1,41; v_{\max} = 1,41.$$

5) Сравниваем  $v_k$  с  $v_{\min}$  и  $v_{\max}$ :

если  $v_k > v_{\max}$  — измерение  $x_k$  отбраковать (промах);

если  $v_k < v_{\min}$  — измерение  $x_k$  оставить;

если  $v_{\min} < v_k < v_{\max}$  — измерение  $x_k$  можно и оставить и отбраковать.

6) Найдём погрешность результата серии измерений:

$${}_n\bar{x}S = \frac{S_n}{\sqrt{n}}.$$

7) Задаем доверительную вероятность  $\alpha$  и находим табличное значение коэффициента Стьюдента  $t(\alpha, n)$ :

$$\alpha = 0,95; t(\alpha, n) = 4,3.$$

8) Определяем  $\Delta x$ :

$$\Delta x = \frac{n}{\bar{x}} S \cdot t(\alpha, n).$$

9) Находим доверительный интервал (если погрешность несоизмерима с погрешностью эксперимента, то за доверительный интервал принимается равным значению  $\Delta x$ ).

10) Находим относительную погрешность результата серии измерений:

$$\delta_x = \frac{\Delta x}{\bar{x}}.$$

11) Приводим результаты измерений к виду:

$$x = (\bar{x} \pm \Delta x).$$

В данной работе были проведены расчеты погрешностей для двух образцов (щепы и опилок), результаты сведем в таблицы 28-.

Таблица 28 – Результаты расчета погрешностей для опилок

| Т, °С | $W_{\text{исп}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ |                      |                      | $\bar{x}$            | $S_n$                | $v_1$ | $v_2$ | $v_3$ | $nS_{\bar{x}}$       | $\alpha$ | $t(\alpha, n)$ | $\Delta x$           | $\delta_x$ |
|-------|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|-------|-------|----------------------|----------|----------------|----------------------|------------|
|       | 1  | 2                    | 3                    |                      |                      |       |       |       |                      |          |                |                      |            |
| 60    | $7,17 \cdot 10^{-5}$   | 0,000195             | 0,000119             | 0,000129             | $6,23 \cdot 10^{-5}$ | 0,92  | 1,06  | 0,15  | $3,95 \cdot 10^{-5}$ | 0,95     | 4,3            | $1,55 \cdot 10^{-3}$ | 1,2        |
|       | $7,57 \cdot 10^{-5}$   | $9,16 \cdot 10^{-5}$ | $9,96 \cdot 10^{-5}$ | $8,89 \cdot 10^{-5}$ | $1,22 \cdot 10^{-5}$ | 1,09  | 0,22  | 0,87  | $7,02 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $3,02 \cdot 10^{-5}$ | 0,339      |
|       | $7,96 \cdot 10^{-5}$   | $8,76 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-5}$ | $8,23 \cdot 10^{-5}$ | $4,6 \cdot 10^{-6}$  | 0,57  | 1,15  | 0,57  | $2,65 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $1,14 \cdot 10^{-5}$ | 0,138      |
|       | $6,77 \cdot 10^{-5}$   | $7,57 \cdot 10^{-5}$ | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 1     | 1     | 0     | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 0,138      |
|       | $7,96 \cdot 10^{-5}$   | $7,57 \cdot 10^{-5}$ | $6,77 \cdot 10^{-5}$ | $7,43 \cdot 10^{-5}$ | $6,08 \cdot 10^{-6}$ | 0,87  | 0,22  | 1,09  | $3,51 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | 0,203      |
|       | $7,96 \cdot 10^{-5}$   | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $6,37 \cdot 10^{-5}$ | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | 1     | 0     | 1     | $4,6 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $1,98 \cdot 10^{-5}$ | 0,275      |
|       | $6,37 \cdot 10^{-5}$   | $6,77 \cdot 10^{-5}$ | $6,77 \cdot 10^{-5}$ | $6,64 \cdot 10^{-5}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15  | 0,57  | 0,57  | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 0,086      |
|       | $6,37 \cdot 10^{-5}$   | $5,97 \cdot 10^{-5}$ | $5,97 \cdot 10^{-5}$ | $6,11 \cdot 10^{-5}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15  | 0,57  | 0,57  | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 0,094      |
|       | $5,97 \cdot 10^{-5}$   | $5,18 \cdot 10^{-5}$ | $5,97 \cdot 10^{-5}$ | $5,71 \cdot 10^{-5}$ | $4,6 \cdot 10^{-6}$  | 0,57  | 1,15  | 0,57  | $2,65 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $1,14 \cdot 10^{-5}$ | 0,2        |
|       | $5,18 \cdot 10^{-5}$   | $4,38 \cdot 10^{-5}$ | $4,78 \cdot 10^{-5}$ | $4,78 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 1     | 1     | 0     | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 0,207      |
|       | $5,18 \cdot 10^{-5}$   | $3,58 \cdot 10^{-5}$ | $4,38 \cdot 10^{-5}$ | $4,38 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | 1     | 1     | 0     | $4,6 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $1,98 \cdot 10^{-5}$ | 0,451      |
|       | $4,78 \cdot 10^{-5}$   | $2,79 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | $3,85 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-5}$    | 0,93  | 1,06  | 0,13  | $5,79 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $2,49 \cdot 10^{-5}$ | 0,646      |
|       | $3,98 \cdot 10^{-5}$   | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $3,19 \cdot 10^{-5}$ | $3,19 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | 1     | 1     | 0     | $4,6 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $1,98 \cdot 10^{-5}$ | 0,621      |
|       | $3,58 \cdot 10^{-5}$   | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $2,79 \cdot 10^{-5}$ | $2,52 \cdot 10^{-5}$ | $1,22 \cdot 10^{-5}$ | 0,87  | 1,09  | 0,22  | $7,02 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $3,02 \cdot 10^{-5}$ | 1,2        |
|       | $2,39 \cdot 10^{-5}$   | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | $2,52 \cdot 10^{-5}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$  | 0,09  | 0,95  | 1,04  | $8,07 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $3,47 \cdot 10^{-5}$ | 1,377      |
|       | $3,19 \cdot 10^{-5}$   | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $1,99 \cdot 10^{-5}$ | $1,99 \cdot 10^{-5}$ | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | 1     | 1     | 0     | $6,9 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $2,97 \cdot 10^{-5}$ | 1,49       |
|       | $1,59 \cdot 10^{-5}$   | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $1,33 \cdot 10^{-5}$ | $4,6 \cdot 10^{-6}$  | 0,57  | 1,15  | 0,57  | $2,65 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $1,14 \cdot 10^{-5}$ | 0,86       |
|       | $1,19 \cdot 10^{-5}$   | $3,38 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 1     | 1     | 0     | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 1,24       |
|       | $1,19 \cdot 10^{-5}$   | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $1,06 \cdot 10^{-5}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57  | 1,15  | 0,57  | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 0,537      |
|       | $3,98 \cdot 10^{-6}$   | 0                    | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0     | 1     | 1     | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 2,48       |
|       | $3,98 \cdot 10^{-6}$   | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | -     | -     | -     | 0                    |          |                | 0                    | 0          |
|       | $3,98 \cdot 10^{-6}$   | 0                    | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0     | 1     | 1     | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 2,48       |
|       | $3,98 \cdot 10^{-6}$   | 0                    | 0                    | $1,33 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15  | 0,57  | 0,57  | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 4,3        |
|       | 0  | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -     | -     | -     | 0                    |          |                | 0                    | -          |
|       | $3,98 \cdot 10^{-6}$   | 0                    | 0                    | $1,33 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15  | 0,57  | 0,57  | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |          |                | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 4,3        |
|       | 0  | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -     | -     | -     | 0                    |          |                | 0                    | -          |
|       | 0  | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -     | -     | -     | 0                    |          |                | 0                    | -          |
|       | 0  | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -     | -     | -     | 0                    |          |                | 0                    | -          |

Продолжение таблицы 28

|     |                      |                      |                      |                      |                      |      |      |      |                      |      |     |                      |       |
|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|------|------|----------------------|------|-----|----------------------|-------|
| 80  | 0,000123             | 0,000151             | 0,000167             | 0,000147             | $2,22 \cdot 10^{-5}$ | 1,07 | 0,18 | 0,89 | $1,28 \cdot 10^{-5}$ | 0,95 | 4,3 | $5,5 \cdot 10^{-5}$  | 0,374 |
|     | 0,000123             | 0,000155             | 0,000127             | 0,000135             | $1,74 \cdot 10^{-5}$ | 0,68 | 1,15 | 0,46 | $1 \cdot 10^{-5}$    |      |     | $4,31 \cdot 10^{-5}$ | 0,318 |
|     | 0,000123             | 0,000119             | 0,000112             | 0,000118             | $6,08 \cdot 10^{-6}$ | 0,87 | 0,22 | 1,09 | $3,51 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | 0,128 |
|     | 0,000135             | 0,000108             | 0,000108             | 0,000117             | $1,61 \cdot 10^{-5}$ | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $9,29 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $4 \cdot 10^{-5}$    | 0,342 |
|     | 0,000104             | $9,96 \cdot 10^{-5}$ | $9,56 \cdot 10^{-5}$ | $9,96 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 1    | 0    | 1    | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |      |     | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 0,099 |
|     | $8,76 \cdot 10^{-5}$ | $9,16 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-5}$ | $8,63 \cdot 10^{-5}$ | $6,08 \cdot 10^{-6}$ | 0,22 | 0,87 | 1,09 | $3,51 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | 0,175 |
|     | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $7,57 \cdot 10^{-5}$ | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $7,3 \cdot 10^{-5}$  | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 1,15 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 0,078 |
|     | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | 0     |
|     | $4,38 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | $4,12 \cdot 10^{-5}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 0,138 |
|     | $3,58 \cdot 10^{-5}$ | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $2,79 \cdot 10^{-5}$ | $6,9 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $3,98 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,71 \cdot 10^{-5}$ | 0,614 |
|     | $2,79 \cdot 10^{-5}$ | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $1,99 \cdot 10^{-5}$ | $2,12 \cdot 10^{-5}$ | $6,08 \cdot 10^{-6}$ | 1,09 | 0,87 | 0,22 | $3,51 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | 0,711 |
|     | $1,99 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $6,9 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $3,98 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,71 \cdot 10^{-5}$ | 1,43  |
|     | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | 0                    | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $5,31 \cdot 10^{-6}$ | $6,08 \cdot 10^{-6}$ | 1,09 | 0,87 | 0,22 | $3,51 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | 2,84  |
|     | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 1    | 0    | 1    | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |      |     | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 2,48  |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $2,65 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 1,15 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 2,15  |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | 0                    | $1,33 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 4,3   |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | 0                    | $1,33 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 4,3   |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | 0                    | $1,33 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 4,3   |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | 0                    | $1,33 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 4,3   |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
| 100 | 0,000235             | 0,000203             | 0,000187             | 0,000208             | $2,43 \cdot 10^{-5}$ | 1,09 | 0,22 | 0,87 | $1,4 \cdot 10^{-5}$  | 0,95 | 4,3 | $6,04 \cdot 10^{-5}$ | 0,289 |
|     | 0,000231             | 0,000195             | 0,000203             | 0,00021              | $1,88 \cdot 10^{-5}$ | 1,13 | 0,77 | 0,35 | $1,09 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $4,67 \cdot 10^{-5}$ | 0,223 |
|     | 0,000203             | 0,000167             | 0,000171             | 0,000181             | $1,96 \cdot 10^{-5}$ | 1,15 | 0,67 | 0,47 | $1,13 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $4,88 \cdot 10^{-5}$ | 0,270 |
|     | 0,000151             | 0,000155             | 0,000143             | 0,00015              | $6,08 \cdot 10^{-6}$ | 0,22 | 0,87 | 1,09 | $3,51 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | 0,101 |
|     | $9,56 \cdot 10^{-5}$ | 0,000131             | $9,96 \cdot 10^{-5}$ | 0,000109             | $1,96 \cdot 10^{-5}$ | 0,67 | 1,15 | 0,47 | $1,13 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $4,88 \cdot 10^{-5}$ | 0,448 |
|     | $6,37 \cdot 10^{-5}$ | $9,96 \cdot 10^{-5}$ | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $7,83 \cdot 10^{-5}$ | $1,88 \cdot 10^{-5}$ | 0,77 | 1,13 | 0,35 | $1,09 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $4,67 \cdot 10^{-5}$ | 0,596 |
|     | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $5,18 \cdot 10^{-5}$ | $4,78 \cdot 10^{-5}$ | $3,58 \cdot 10^{-5}$ | $2,42 \cdot 10^{-5}$ | 1,15 | 0,66 | 0,49 | $1,4 \cdot 10^{-5}$  |      |     | $6,01 \cdot 10^{-5}$ | 1,678 |
|     | 0                    | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $1,38 \cdot 10^{-5}$ | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $7,96 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $3,42 \cdot 10^{-5}$ | 2,15  |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $6,64 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 0,86  |
|     | 0                    | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 1    | 0    | 1    | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |      |     | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 2,48  |
|     | 0                    | 0                    | $1,19 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $6,9 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 0,57 | 1,15 | $3,98 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,71 \cdot 10^{-5}$ | 4,3   |
|     | 0                    | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | $1,33 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 1,15 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 4,3   |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |

Продолжение таблицы 28

|     |                      |                      |                      |                      |                      |      |      |      |                      |      |     |                      |       |
|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|------|------|----------------------|------|-----|----------------------|-------|
| 120 | 0,000259             | 0,000307             | 0,000327             | 0,000297             | $3,48 \cdot 10^{-5}$ | 1,11 | 0,27 | 0,84 | $2,01 \cdot 10^{-5}$ | 0,95 | 4,3 | $8,64 \cdot 10^{-5}$ | 0,291 |
|     | 0,000283             | 0,000319             | 0,000303             | 0,000301             | $1,8 \cdot 10^{-5}$  | 1,03 | 0,96 | 0,07 | $1,04 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $4,46 \cdot 10^{-5}$ | 0,148 |
|     | 0,000243             | 0,000207             | 0,000207             | 0,000219             | $2,07 \cdot 10^{-5}$ | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,19 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $5,14 \cdot 10^{-5}$ | 0,234 |
|     | 0,000123             | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $8,76 \cdot 10^{-5}$ | $9,43 \cdot 10^{-5}$ | $2,65 \cdot 10^{-5}$ | 1,1  | 0,85 | 0,25 | $1,53 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $6,58 \cdot 10^{-5}$ | 0,698 |
|     | $4,38 \cdot 10^{-5}$ | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $2,52 \cdot 10^{-5}$ | $1,8 \cdot 10^{-5}$  | 1,03 | 0,07 | 0,96 | $1,04 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $4,46 \cdot 10^{-5}$ | 1,77  |
|     | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $6,9 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $3,98 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,71 \cdot 10^{-5}$ | 2,15  |
|     | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $6,64 \cdot 10^{-6}$ | $4,6 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $2,65 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,14 \cdot 10^{-5}$ | 1,72  |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | $2,65 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 0,57 | 1,15 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 2,15  |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $2,65 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 1,15 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 2,15  |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |

Таблица 29 – Результаты расчета погрешностей для щепы

| Т, °С | $W_{\text{исп}}, \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ |                      |                      | $\bar{x}$            | $S_n$                 | $v_1$ | $v_2$ | $v_3$ | $\frac{n}{\bar{x}}S$  | $\alpha$ | $t(\alpha, n)$ | $\Delta x$            | $\delta_x$ |
|-------|---|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-----------------------|----------|----------------|-----------------------|------------|
|       | 1   | 2                    | 3                    |                      |                       |       |       |       |                       |          |                |                       |            |
| 60    | $7,57 \cdot 10^{-5}$  | $8,76 \cdot 10^{-5}$ | $6,77 \cdot 10^{-5}$ | $7,7 \cdot 10^{-5}$  | $1 \cdot 10^{-5}$     | 0,13  | 1,06  | 0,92  | $5,79 \cdot 10^{-6}$  | 0,95     | 4,3            | $2,49 \cdot 10^{-5}$  | 0,32       |
|       | $8,36 \cdot 10^{-5}$  | $7,57 \cdot 10^{-5}$ | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $1,44 \cdot 10^{-5}$  | 0,83  | 0,27  | 1,1   | $8,29 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $3,56 \cdot 10^{-5}$  | 0,497      |
|       | $6,77 \cdot 10^{-5}$  | $6,37 \cdot 10^{-5}$ | $5,18 \cdot 10^{-5}$ | $6,11 \cdot 10^{-5}$ | $8,29 \cdot 10^{-6}$  | 0,8   | 0,32  | 1,12  | $4,79 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $2,06 \cdot 10^{-5}$  | 0,337      |
|       | $5,97 \cdot 10^{-5}$  | $6,37 \cdot 10^{-5}$ | $4,38 \cdot 10^{-5}$ | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | $1,05 \cdot 10^{-5}$  | 0,37  | 0,75  | 1,13  | $6,08 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $2,62 \cdot 10^{-5}$  | 0,469      |
|       | $5,97 \cdot 10^{-5}$  | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | $5,18 \cdot 10^{-5}$ | $1,05 \cdot 10^{-5}$  | 0,76  | 0,37  | 1,13  | $6,08 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $2,62 \cdot 10^{-5}$  | 0,505      |
|       | $5,97 \cdot 10^{-5}$  | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | $5,18 \cdot 10^{-5}$ | $1,05 \cdot 10^{-5}$  | 0,76  | 0,37  | 1,13  | $6,08 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $2,62 \cdot 10^{-5}$  | 0,505      |
|       | $5,58 \cdot 10^{-5}$  | $4,38 \cdot 10^{-5}$ | $3,58 \cdot 10^{-5}$ | $4,51 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-5}$     | 1,06  | 0,13  | 0,93  | $5,79 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $2,49 \cdot 10^{-5}$  | 0,551      |
|       | $5,18 \cdot 10^{-5}$  | $3,58 \cdot 10^{-5}$ | $3,19 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | $1,05 \cdot 10^{-5}$  | 1,13  | 0,37  | 0,76  | $6,08 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $2,62 \cdot 10^{-5}$  | 0,657      |
|       | $4,38 \cdot 10^{-5}$  | $4,38 \cdot 10^{-5}$ | $2,79 \cdot 10^{-5}$ | $3,85 \cdot 10^{-5}$ | $9,2 \cdot 10^{-6}$   | 0,57  | 0,57  | 1,15  | $5,31 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $2,28 \cdot 10^{-5}$  | 0,593      |
|       | $3,98 \cdot 10^{-5}$  | $3,19 \cdot 10^{-5}$ | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $3,19 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$  | 1     | 0     | 1     | $4,6 \cdot 10^{-6}$   |          |                | $1,98 \cdot 10^{-5}$  | 0,621      |
|       | $3,19 \cdot 10^{-5}$  | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$  | 1     | 0     | 1     | $4,6 \cdot 10^{-6}$   |          |                | $1,98 \cdot 10^{-5}$  | 0,827      |
|       | $2,79 \cdot 10^{-5}$  | $1,99 \cdot 10^{-5}$ | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $2,12 \cdot 10^{-5}$ | $6,08 \cdot 10^{-6}$  | 1,09  | 0,22  | 0,87  | $3,51 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $1,51 \cdot 10^{-5}$  | 0,711      |
|       | $1,99 \cdot 10^{-5}$  | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $1,46 \cdot 10^{-5}$ | $4,6 \cdot 10^{-6}$   | 1,15  | 0,57  | 0,57  | $2,65 \cdot 10^{-6}$  |          |                | $1,14 \cdot 10^{-5}$  | 0,782      |
|       | $1,59 \cdot 10^{-5}$  | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$  | 1     | 0     | 1     | $2,3 \cdot 10^{-6}$   |          |                | $9,89 \cdot 10^{-6}$  | 0,827      |
|       | $7,96 \cdot 10^{-6}$  | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $1,38 \cdot 10^{-19}$ | 1     | 0     | 0,999 | $7,97 \cdot 10^{-20}$ |          |                | $3,43 \cdot 10^{-19}$ | 0          |

Продолжение таблицы 29

|     |                      |                      |                      |                      |                      |      |      |      |                      |      |     |                      |       |
|-----|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------|------|------|----------------------|------|-----|----------------------|-------|
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $5,31 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 1,15 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 1,075 |
|     | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $5,31 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 1,075 |
|     | 0                    | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $2,65 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 2,15  |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0    | 1    | 1    | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |      |     | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 2,48  |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | 0                    | $1,33 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 4,3   |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
| 80  | $6,37 \cdot 10^{-5}$ | 0,000112             | 0,000119             | $9,82 \cdot 10^{-5}$ | $3,02 \cdot 10^{-5}$ | 1,14 | 0,44 | 0,7  | $1,74 \cdot 10^{-5}$ | 0,95 | 4,3 | $7,49 \cdot 10^{-5}$ | 0,762 |
|     | $9,96 \cdot 10^{-5}$ | $8,36 \cdot 10^{-5}$ | $9,96 \cdot 10^{-5}$ | $9,43 \cdot 10^{-5}$ | $9,2 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 1,15 | 0,57 | $5,31 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $2,28 \cdot 10^{-5}$ | 0,242 |
|     | 0,000108             | $7,57 \cdot 10^{-5}$ | $7,57 \cdot 10^{-5}$ | $8,63 \cdot 10^{-5}$ | $1,84 \cdot 10^{-5}$ | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,06 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $4,57 \cdot 10^{-5}$ | 0,529 |
|     | $9,56 \cdot 10^{-5}$ | $5,18 \cdot 10^{-5}$ | $5,58 \cdot 10^{-5}$ | $6,77 \cdot 10^{-5}$ | $2,42 \cdot 10^{-5}$ | 1,15 | 0,66 | 0,49 | $1,4 \cdot 10^{-5}$  |      |     | $6,01 \cdot 10^{-5}$ | 0,888 |
|     | $8,36 \cdot 10^{-5}$ | $4,78 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | $5,71 \cdot 10^{-5}$ | $2,33 \cdot 10^{-5}$ | 1,14 | 0,39 | 0,74 | $1,35 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $5,79 \cdot 10^{-5}$ | 1,015 |
|     | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $3,58 \cdot 10^{-5}$ | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $4,38 \cdot 10^{-5}$ | $2,49 \cdot 10^{-5}$ | 1,12 | 0,32 | 0,8  | $1,44 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $6,17 \cdot 10^{-5}$ | 1,409 |
|     | $5,97 \cdot 10^{-5}$ | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $3,32 \cdot 10^{-5}$ | $2,33 \cdot 10^{-5}$ | 1,13 | 0,39 | 0,74 | $1,35 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $5,79 \cdot 10^{-5}$ | 1,746 |
|     | $4,78 \cdot 10^{-5}$ | $1,99 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $2,52 \cdot 10^{-5}$ | $2,04 \cdot 10^{-5}$ | 1,1  | 0,26 | 0,84 | $1,18 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $5,07 \cdot 10^{-5}$ | 2,012 |
|     | $3,19 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $1,46 \cdot 10^{-5}$ | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | 1,14 | 0,44 | 0,7  | $8,7 \cdot 10^{-6}$  |      |     | $3,74 \cdot 10^{-5}$ | 2,56  |
|     | $2,79 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $1,33 \cdot 10^{-5}$ | $1,28 \cdot 10^{-5}$ | 1,14 | 0,41 | 0,73 | $7,39 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $3,18 \cdot 10^{-5}$ | 2,39  |
|     | $1,59 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | $6,64 \cdot 10^{-6}$ | $8,29 \cdot 10^{-6}$ | 1,12 | 0,32 | 0,8  | $4,79 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $2,06 \cdot 10^{-5}$ | 3,1   |
|     | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $5,31 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 1,075 |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | 0                    | $1,33 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 1,15 | 0,57 | 0,57 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 4,3   |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | $2,65 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 0,57 | 1,15 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 2,15  |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
|     | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | -    | -    | -    | 0                    |      |     | 0                    | -     |
| 100 | 0,000175             | 0,000195             | 0,000171             | 0,000181             | $1,28 \cdot 10^{-5}$ | 0,41 | 1,14 | 0,73 | $7,39 \cdot 10^{-6}$ | 0,95 | 4,3 | $3,18 \cdot 10^{-5}$ | 0,176 |
|     | 0,000195             | 0,000417             | 0,000163             | 0,000169             | $2,43 \cdot 10^{-5}$ | 1,09 | 0,87 | 0,22 | $1,4 \cdot 10^{-5}$  |      |     | $6,04 \cdot 10^{-5}$ | 0,358 |
|     | 0,000143             | 0,000112             | 0,000119             | 0,000125             | $1,66 \cdot 10^{-5}$ | 1,12 | 0,8  | 0,32 | $9,57 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $4,12 \cdot 10^{-5}$ | 0,329 |
|     | 0,000112             | $7,17 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-5}$ | $8,76 \cdot 10^{-5}$ | $2,11 \cdot 10^{-5}$ | 1,13 | 0,76 | 0,38 | $1,22 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $5,23 \cdot 10^{-5}$ | 0,597 |
|     | $6,77 \cdot 10^{-5}$ | $3,98 \cdot 10^{-5}$ | $4,78 \cdot 10^{-5}$ | $5,18 \cdot 10^{-5}$ | $1,44 \cdot 10^{-5}$ | 1,11 | 0,83 | 0,28 | $8,29 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $3,56 \cdot 10^{-5}$ | 0,688 |
|     | $3,19 \cdot 10^{-5}$ | $1,99 \cdot 10^{-5}$ | $2,39 \cdot 10^{-5}$ | $2,52 \cdot 10^{-5}$ | $6,08 \cdot 10^{-6}$ | 1,09 | 0,87 | 0,22 | $3,51 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,51 \cdot 10^{-5}$ | 0,598 |
|     | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0    | 1    | 1    | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |      |     | $9,89 \cdot 10^{-6}$ | 1,24  |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $7,96 \cdot 10^{-6}$ | $5,31 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 0,57 | 1,15 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 1,075 |
|     | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | $3,98 \cdot 10^{-6}$ | 0                    | $2,65 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$  | 0,57 | 0,57 | 1,15 | $1,33 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,71 \cdot 10^{-6}$ | 2,15  |



Продолжение таблицы 29

|     |                     |                     |                     |                     |                     |      |      |      |                     |      |     |                     |       |
|-----|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|------|------|------|---------------------|------|-----|---------------------|-------|
|     | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | -    | -    | -    | 0                   |      |     | 0                   | -     |
|     | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | -    | -    | -    | 0                   |      |     | 0                   | -     |
|     | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | -    | -    | -    | 0                   |      |     | 0                   | -     |
| 120 | 0,0002              | 0,00016             | 0,0002              | 0,00019             | $2 \cdot 10^{-5}$   | 0,47 | 1,15 | 0,67 | $1,1 \cdot 10^{-5}$ | 0,95 | 4,3 | $4,9 \cdot 10^{-5}$ | 0,262 |
|     | 0,00029             | 0,00022             | 0,00014             | 0,00022             | $7,4 \cdot 10^{-5}$ | 0,97 | 0,05 | 1,03 | $4,3 \cdot 10^{-5}$ |      |     | 0,00018             | 0,836 |
|     | 0,00022             | 0,00015             | $7,6 \cdot 10^{-5}$ | 0,00015             | $7 \cdot 10^{-5}$   | 0,97 | 0,05 | 1,03 | $4 \cdot 10^{-5}$   |      |     | 0,00017             | 1,176 |
|     | 0,00011             | $8,8 \cdot 10^{-5}$ | $3,6 \cdot 10^{-5}$ | $7,7 \cdot 10^{-5}$ | $3,7 \cdot 10^{-5}$ | 0,83 | 0,28 | 1,11 | $2,1 \cdot 10^{-5}$ |      |     | $9,2 \cdot 10^{-5}$ | 1,193 |
|     | $3,2 \cdot 10^{-5}$ | $4 \cdot 10^{-5}$   | $1,6 \cdot 10^{-5}$ | $2,9 \cdot 10^{-5}$ | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | 0,22 | 0,87 | 1,09 | $7 \cdot 10^{-6}$   |      |     | $3 \cdot 10^{-5}$   | 1,034 |
|     | $4 \cdot 10^{-6}$   | $2 \cdot 10^{-5}$   | $8 \cdot 10^{-6}$   | $1,1 \cdot 10^{-5}$ | $8,3 \cdot 10^{-6}$ | 0,8  | 1,12 | 0,32 | $4,8 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $2,1 \cdot 10^{-5}$ | 1,938 |
|     | 0                   | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | $4 \cdot 10^{-6}$   | $5,3 \cdot 10^{-6}$ | $6,1 \cdot 10^{-6}$ | 0,87 | 1,09 | 0,22 | $3,5 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $1,5 \cdot 10^{-5}$ | 2,844 |
|     | 0                   | $4 \cdot 10^{-6}$   | 0                   | $1,3 \cdot 10^{-6}$ | $2,3 \cdot 10^{-6}$ | 0,57 | 1,15 | 0,57 | $1,3 \cdot 10^{-6}$ |      |     | $5,7 \cdot 10^{-6}$ | 4,3   |
|     | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | -    | -    | -    | 0                   |      |     | 0                   | -     |
|     | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | 0                   | -    | -    | -    | 0                   |      |     | 0                   | -     |

### 3.2 Расчет парциального давления и коэффициента аккомодации

В ходе эксперимента для щепы и опилок при заданных температурах в диапазоне от 60 °С до 120 °С, была найдена масса испарившейся влаги, через каждые 10 минут после ее сушки в сушильной камере для всех исследуемых образцов по формуле:

$$m_i - m_{i+1} = \Delta m. \quad (3.2.1)$$

Массовая скорость испарения жидкости из древесины найдена по формуле:

$$W_{\text{исп}} = \frac{\Delta m}{S \cdot t}, \quad \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right], \quad (3.2.2)$$

где  $W_{\text{исп}}$  – массовая скорость испарения,  $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$ ;

$S$  – площадь емкости,  $S = 0,020925 \text{ м}^2$ ;

$t$  – время сушки,  $t = 600 \text{ с}$ .

Следующим этапом исследования является определение парциального давления и коэффициента аккомодации на поверхности исследуемых образцов, для этого воспользуемся уравнением Герца-Кнудсена:

$$W_{\text{исп}} = \frac{A \cdot (p^H - p^*)}{\sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}} \rightarrow A = \frac{W_{\text{исп}} \cdot \sqrt{\frac{2\pi RT}{M}}}{(p^H - p^*)}, \quad (3.2.3)$$

где  $p^H$  – давление насыщенного пара, Па;

$p^*$  – парциальное давление, Па;

$R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8314 \text{ Дж/кмоль} \cdot \text{К}$ ;

$M$  – молекулярный вес;

$T$  – температура вещества, К;

$A$  – коэффициент аккомодации.

Подставив полученные значения скорости испарения, найденные экспериментальным путем в уравнение (3.2.3), находим парциальное давление и коэффициент аккомодации. Но так как в уравнении получается

две неизвестных, воспользуемся уравнением состояния (3.2.4) для нахождения этих величин.

Уравнение состояния:

$$p \cdot V = (m_{\text{с.в.}} + m_{\text{H}_2\text{O}}) \cdot \frac{R}{M} \cdot T, \quad (3.2.4)$$

где  $p$  — давление насыщенного пара, Па;

$V$  — объем сушильной камеры,  $V = 0,36 \text{ м}^3$ ;

$m_{\text{с.в.}}$  — масса сухого воздуха, кг;

$m_{\text{H}_2\text{O}}$  — масса водяного пара, кг;

Примечание: давление насыщения находим по таблице термодинамических свойств воды и водяного пара, по температуре, установленной в сушильной камере в диапазоне от 60 °С до 120 °С для каждого образца древесины.

Из уравнения состояния (3.2.5) находим массу сухого воздуха:

$$m_{\text{с.в.}} = \left[ \frac{p \cdot V}{R \cdot T} - \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}} \right] \cdot M_{\text{с.в.}}, \quad (3.2.5)$$

где  $p$  — давление насыщения, определяемое из таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара, по температуре влажного воздуха;

$m_{\text{H}_2\text{O}}$  — масса испарившейся влаги из всего образца, кг;

$M_{\text{H}_2\text{O}}$  — молекулярная масса водяного пара,  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \text{ г/моль}$ ;

$M_{\text{с.в.}}$  — молекулярная масса сухого воздуха,  $M_{\text{с.в.}} = 29 \text{ г/моль}$ .

Для нахождения массы влаги, испарившейся из всего образца, необходимо найти массу испарившейся влаги в начальный момент времени, которая находится по формуле:

$$m_{\text{H}_2\text{O}}(0) = d \cdot M_{\text{с.в.}}, \quad (3.2.6)$$

где  $M_{\text{с.в.}}$  — молекулярная масса сухого воздуха в камере в начальный момент времени;

$d$  — влагосодержание влажного воздуха.

Влагосодержание влажного воздуха – это отношение массы пара к массе сухого воздуха:

$$d = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{с.в.}}}; \quad (3.2.7)$$

Из уравнения состояния идеального газа и формулы для нахождения относительной влажности получим формулу для расчета влагосодержания влажного воздуха:

$$d = 0,622 \cdot \frac{(\varphi \cdot P_s)}{B - (\varphi \cdot P_s)}, \quad (3.2.8)$$

где  $B$  – атмосферное давление,  $B = 101320$  Па;

$\varphi$  – относительная влажность воздуха, принимаем  $\varphi = 50\%$ ;

$P_s$  – давление насыщения, принимаемое по таблице термодинамических свойств воды и водяного пара.

Массу сухого воздуха в камере находим по формуле:

$$M_{\text{с.в.}} = V \cdot \rho_{\text{с.в.}}, \quad (3.2.9)$$

где  $\rho_{\text{с.в.}}$  – плотность сухого воздуха.

Плотность сухого воздуха в помещении находится по формуле:

$$\rho_{\text{с.в.}} = \frac{B - \varphi \cdot P_s}{\frac{R}{M} \cdot T}; \quad (3.2.10)$$

Примечание: принимаем давление насыщенного пара по таблице термодинамических свойств воды и водяного пара, при начальной температуре в камере  $T = 298$  К, получаем  $P_s = 3170$  Па.

Зная массу испарившейся влаги в начальный момент времени и массу испарившейся влаги через каждые 10 минут сушки, находим общую массу влаги, испарившейся из всего образца:

$$m_{\text{H}_2\text{O}} = \Delta m + m_{\text{H}_2\text{O}}(0), \quad (3.2.11)$$

где  $\Delta m$  – масса испарившейся влаги из образца в течение 10 минут;

$m_{\text{H}_2\text{O}}(0)$  – масса испарившейся влаги в начальный момент времени.

Находим молекулярную массу влажного воздуха из уравнения состояния (3.2.4):

$$M = \frac{m_{H_2O} + \left[ \frac{p \cdot V}{R \cdot T} - \frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right] \cdot M_{c.B.}}{\left[ \frac{p \cdot V}{R \cdot T} \right]}; \quad (3.2.12)$$

Получив значения общей массы испарившейся влаги, массу сухого воздуха и молекулярный вес для каждого образца при заданной температуре, можем найти объемные и массовые доли испарившейся влаги по формулам (3.2.13-3.2.14).

Массовые доли водяного пара находятся по формуле:

$$g_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + \left[ \frac{p \cdot V}{R \cdot T} - \frac{m_{H_2O}}{M_{H_2O}} \right] \cdot M_{c.B.}}; \quad (3.2.13)$$

Объемные доли водяного пара находим по формуле:

$$r_{H_2O} = \frac{g_{H_2O} \cdot M}{M_{H_2O}}, \quad (3.2.14)$$

где  $M$  — молекулярная масса влажного воздуха.

Зная объемные доли испарившейся влаги и давление насыщенного пара находим парциальное давление для каждого образца:

$$p_{H_2O} = r_{H_2O} \cdot p_H; \quad (3.2.15)$$

Полученные значения парциального давления и массовой скорости испарения жидкости из древесины подставляем в формулу (3.2.3) и находим коэффициент аккомодации для всех исследуемых образцов биомассы.

Результаты расчётов парциального давления и коэффициента аккомодации сведены в таблицы 30-31 и представлены ниже для щепы и опилок в диапазоне температур в сушильной камере от 60 °С до 120 °С.

Таблица 30 – Результаты расчета коэффициента аккомодации для опилок

| T, °C | $\frac{W_{\text{исп}}, \text{ кг}}{(\text{м}^2 \cdot \text{с})}$ | $p^H, \text{ Па}$ | $p^*, \text{ Па}$ | $\frac{M_{\text{с.в.}}, \text{ г}}{\text{моль}}$ | $m_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ кг}$ | $\frac{M_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ г}}{\text{моль}}$ | A                    |
|-------|--|-------------------|-------------------|--|--------------------------------------|---|----------------------|
| 60    | $3,5 \cdot 10^{-5}$  | 19945             | 9733,5            | 29   | 0,0228                               | 18  | $4,76 \cdot 10^{-6}$ |
| 80    | $4,76 \cdot 10^{-5}$   | 47414             | 27535,4           | 29   | 0,0608                               | 18  | $3,15 \cdot 10^{-6}$ |
| 100   | $7,72 \cdot 10^{-5}$   | 101418            | 54152,1           | 29   | 0,1132                               | 18  | $2,3 \cdot 10^{-6}$  |
| 120   | $10,6 \cdot 10^{-5}$   | 198665            | 85706,9           | 29   | 0,1699                               | 18  | $1,5 \cdot 10^{-6}$  |

Таблица 31 – Результаты расчета коэффициента аккомодации для щепы

| T, °C | $\frac{W_{\text{исп}}, \text{ кг}}{(\text{м}^2 \cdot \text{с})}$ | $p^H, \text{ Па}$ | $p^*, \text{ Па}$ | $\frac{M_{\text{с.в.}}, \text{ г}}{\text{моль}}$ | $m_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ кг}$ | $\frac{M_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ г}}{\text{моль}}$ | A                    |
|-------|--|-------------------|-------------------|--|--------------------------------------|---|----------------------|
| 60    | $3,1 \cdot 10^{-5}$  | 19945             | 9711,9            | 29   | 0,0227                               | 18  | $4,22 \cdot 10^{-6}$ |
| 80    | $3,93 \cdot 10^{-5}$   | 47414             | 27488,2           | 29   | 0,0607                               | 18  | $2,59 \cdot 10^{-6}$ |
| 100   | $7,27 \cdot 10^{-5}$   | 101418            | 54125,1           | 29   | 0,1131                               | 18  | $2,17 \cdot 10^{-6}$ |
| 120   | $8,45 \cdot 10^{-5}$   | 198665            | 85570,8           | 29   | 0,1697                               | 18  | $1,19 \cdot 10^{-6}$ |

#### **4 Анализ полученных результатов измерений**

Для более наглядного представления и анализа полученных результатов были построены зависимости массовой скорости испарения жидкости от времени, в интервале температур от 60 °С до 120 °С.

Построим зависимость массовой скорости испарения от времени для опилок с учетом доверительного интервала (рис.6-9) и для щепы с учетом доверительного интервала (рис.10-13).

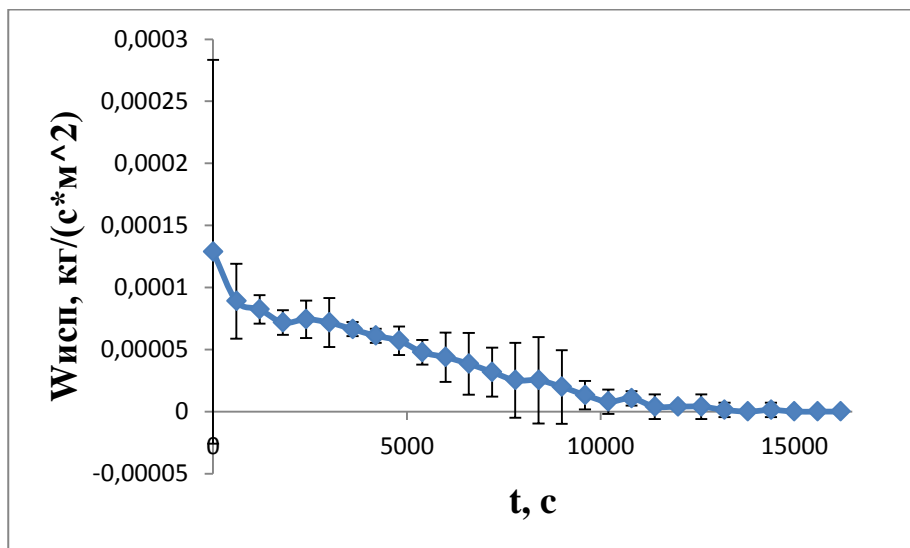


Рисунок 6 – При  $60^\circ\text{C}$

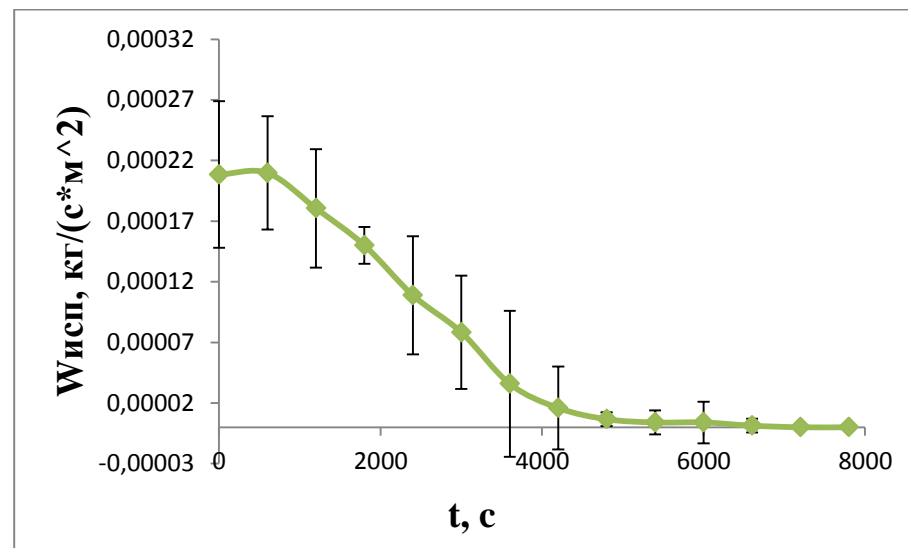


Рисунок 8 – При  $100^\circ\text{C}$

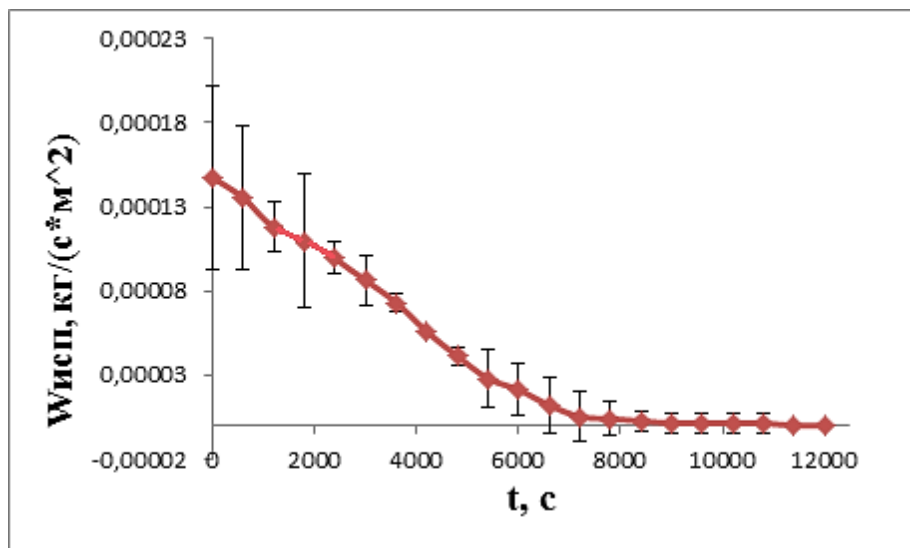


Рисунок 7 – При  $80^\circ\text{C}$

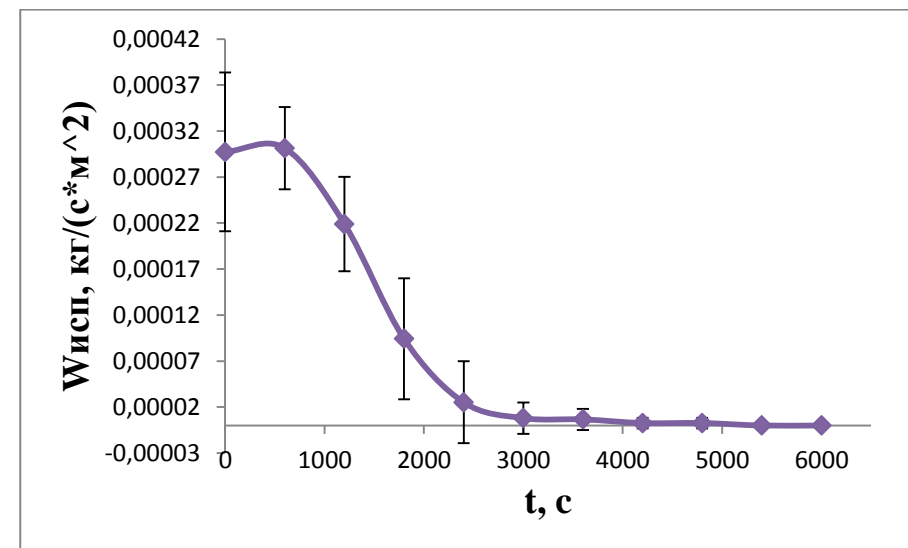


Рисунок 9 – При  $120^\circ\text{C}$



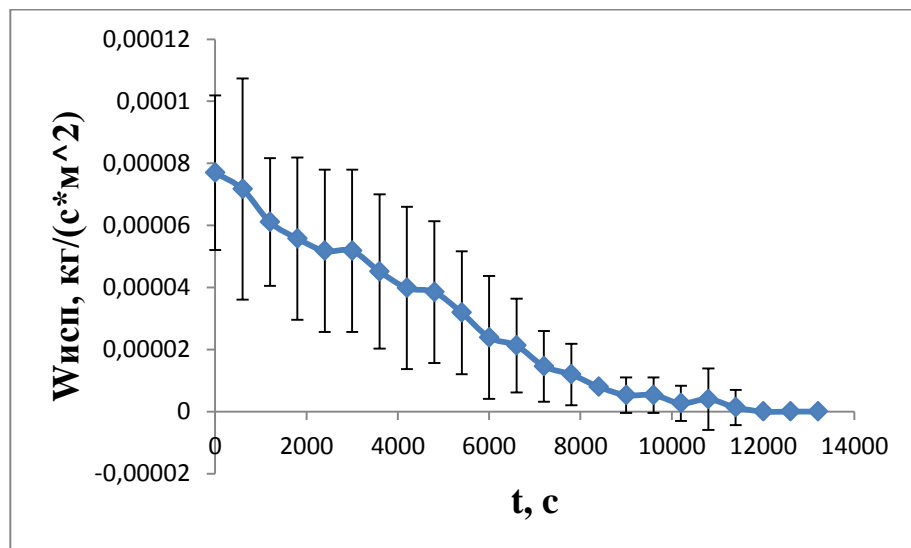


Рисунок 10 – При  $60^\circ \text{C}$

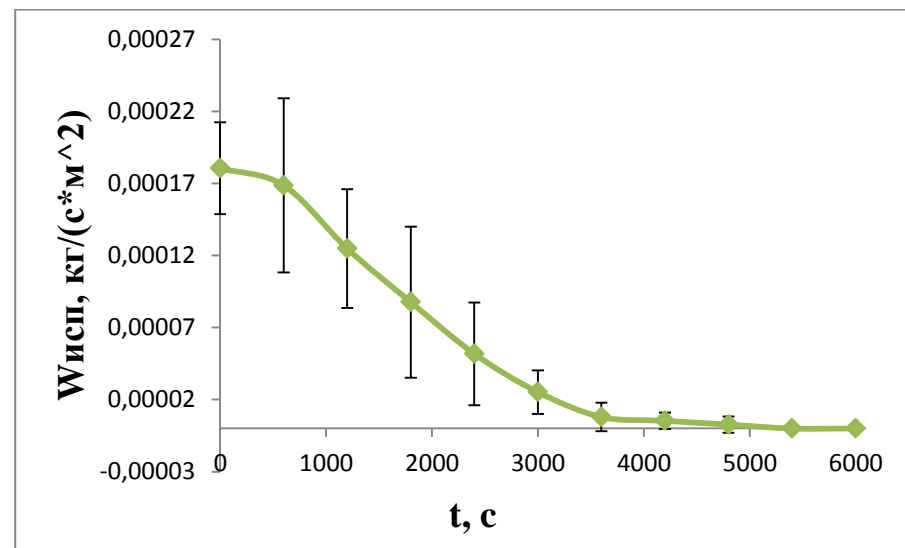


Рисунок 12 – При  $100^\circ \text{C}$

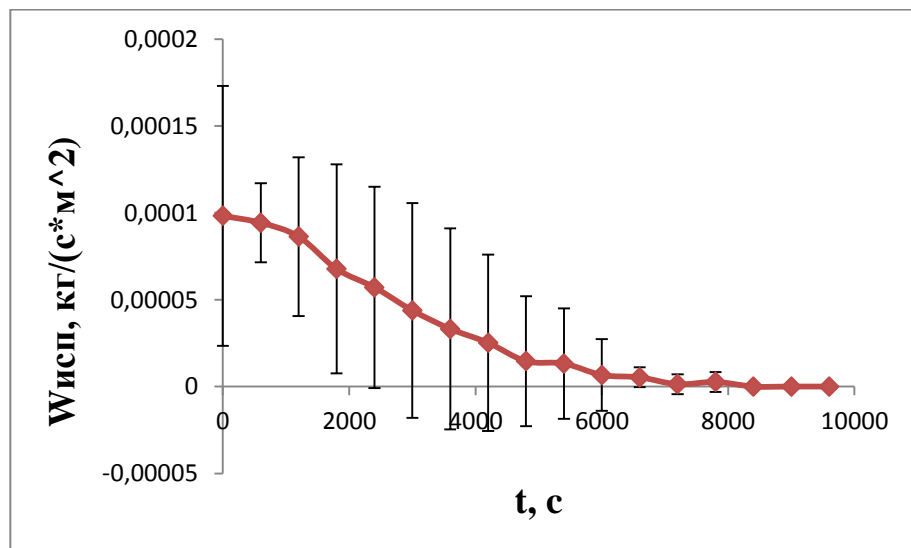


Рисунок 11 – При  $80^\circ \text{C}$

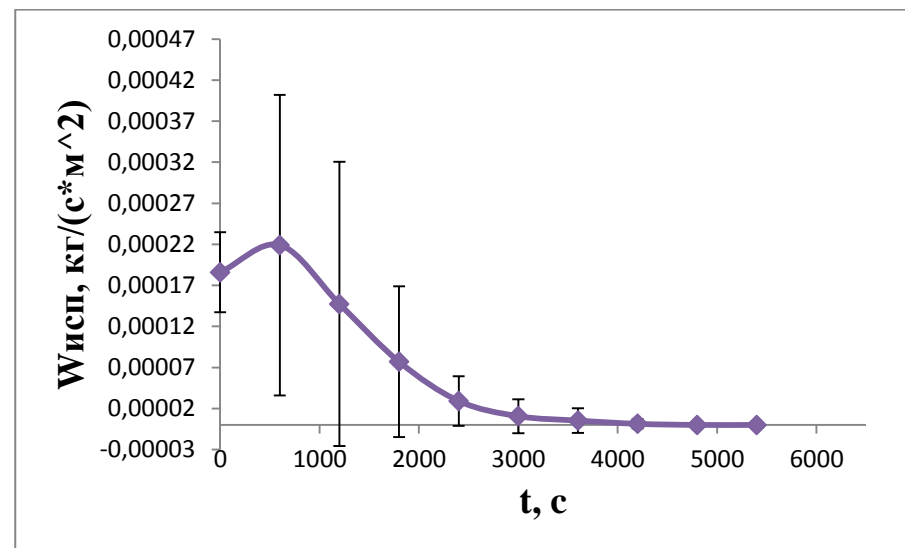


Рисунок 13 – При  $120^\circ \text{C}$

### **Выводы по экспериментальному исследованию**

Проведены исследования теплофизических свойств отходов лесопиления и деревообработки хвойных пород древесины в диапазоне температур от 60 °С до 120 °С. Рассчитан коэффициент аккомодации и парциальное давление на поверхности испарения для каждого образца биомассы. Получены зависимости массовой скорости испарения от времени и температуры для каждого образца биомассы.

Как видно из полученных зависимостей для опилок (рис.6-9), процесс испарения жидкости стационарный в диапазоне температур 60-80 °С, скорость испарения медленно убывающая. При температурах 100 °С и 120 °С скорость испарения резко возрастает до определенного промежутка времени, который приблизительно равен 10 минутам, повышение скорости испарения объясняется тем, что вместе со свободной влагой, которая покрывает поверхность материала, начинает испаряться и связанная, что увеличивает общую скорость испарения. После периода в 10 минут скорость испарения постепенно понижается и в итоге становится постоянной, что говорит о том, что влага перестает испаряться из образца.

Из полученных зависимостей для щепы (рис.10-13) можно сделать аналогичные выводы, единственное различие в том, что в данном эксперименте лишь при температуре в сушильной камере 120 °С можно наблюдать резкое увеличение массовой скорости в промежутке времени равным 10 минутам, что характеризует испарение связанной влаги. После 10 минут характерна медленно убывающая скорость испарения, которая в итоге становится постоянной.

Анализ полученных зависимостей показал, что при увеличении температуры в сушильной камере, время проведения эксперимента уменьшается.

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью выполнения данного раздела является экономическое обоснование научно–исследовательской работы. Оценка является комплексной и произведена в разрезе экономической эффективности, социальной значимости и других аспектов, т.к. проведение экспериментальных исследований процесса испарения жидкости из отходов лесопиления и деревообработки требует привлечения финансовых затрат и других ресурсов, которые должны быть экономически оправданы и целесообразны.

### **5.1. Анализ конкурентных технических решений**

В качестве основных конкурентных технических решений были выбраны:

- 1) Исследование процесса влагоудаления с помощью математической модели;
- 2) Разработка Floradry GmbH сушильная двух ленточная камера;
- 3) Реализованный эксперимент в сушильном шкафу.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для её будущего повышения.

В таблице 32 представлена оценочная карта конкурентных технических решений.

Таблица 32 – Оценочная карта

| Критерии оценки                                  | Вес критерия | Баллы           |                 |                | Конкурентоспособность |                 |                |
|--|--------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------------|-----------------|----------------|
|  |              | Б <sub>к1</sub> | Б <sub>к2</sub> | Б <sub>р</sub> | К <sub>к1</sub>       | К <sub>к2</sub> | К <sub>р</sub> |
| Технические критерии оценки ресурсоэффективности |              |                 |                 |                |                       |                 |                |
| Простота в эксплуатации                          | 0,11         | 2               | 3               | 5              | 0,22                  | 0,33            | 0,55           |
| Энергоэкономичность                              | 0,15         | 3               | 3               | 4              | 0,45                  | 0,45            | 0,6            |
| Надежность                                       | 0,05         | 4               | 4               | 3              | 0,2                   | 0,2             | 0,15           |
| Уровень шума                                     | 0,09         | 4               | 4               | 5              | 0,36                  | 0,36            | 0,45           |
| Безопасность                                     | 0,2          | 4               | 5               | 5              | 0,8                   | 1               | 1              |
| Экономические критерии оценки эффективности      |              |                 |                 |                |                       |                 |                |
| Конкурентоспособность                            | 0,13         | 3               | 4               | 3              | 0,39                  | 0,52            | 0,39           |
| Цена   | 0,1          | 3               | 2               | 3              | 0,3                   | 0,2             | 0,3            |
| Финансирование научной разработки                | 0,17         | 4               | 4               | 4              | 0,68                  | 0,68            | 0,68           |
| Итого  | 1            | 27              | 29              | 32             | 3,4                   | 3,74            | 4,12           |

Итогом данного анализа является то, что разработанный эксперимент имеет перспективу и вполне конкурентоспособен.

## 5.2. SWOT-анализ

На основе анализа рынка и конкурентных технических решений, была составлена матрица SWOT анализа, матрица SWOT анализа представлена в таблице 33.

Таблица 33 – SWOT анализ

|                 |   | Внутренние факторы   |   |
|-----------------|---|--|---|
|                 |   | Сильные стороны проекта:<br>- Широкие возможности по расширению исследований,<br>- Возможность обработки результатов не в лаборатории. | Слабые стороны проекта:<br>- Относительная сложность создания новых условий экспериментов,<br>- Требовательность к погрешностям измерений.                    |
| Внешние факторы | Возможности:<br>- Автоматизация процесса влагоудаления,<br>- Централизованное хранение результатов обработки для конкретных задач эксперимента. | - Реализовать графически зависимости эксперимента,<br>- Обеспечить поддержку ПО после введения в эксплуатацию.                         | - Предусмотреть готовые механизмы получения графических зависимостей,<br>- Реализовать математическое моделирование процесса.                                 |
|                 | Угрозы:<br>- Невостребованность результатов,<br>- Отсутствие подходящих установок для сушки.  | Использовать новые ранее не изученные породы древесины   | - Написать руководство к установке,<br>- Осуществить оптимизацию экспериментов,<br>- Предусмотреть возможность удаления неактуальных результатов эксперимента |

## 5.3. Планирование научно-исследовательских работ

### 5.3.1. Структура работ в рамках научного исследования

Планирование работ включает в себя: составление перечня работ; определение участников каждой отдельной работы; установление продолжительности работ.

Составим перечень работ, которые необходимо произвести для достижения цели. Сведения об этапах, их продолжительности и сотрудниках, работающих над выполнением проекта, представлены в таблице 34.

Над выполнением работы трудятся: НР – научный руководитель; И – инженер.

Таблица 34 – Перечень работ по проекту

| № п/п | Наименование работ   | Исполнитель |
|-------|--|-------------|
| 1     | Выбор научного руководителя бакалаврской работы  | И           |
| 2     | Составление и утверждение темы бакалаврской работы                                       | И<br>НР     |
| 3     | Составление календарного плана-графика выполнения бакалаврской работы                    | НР          |
| 4     | Подбор и изучение литературы по теме бакалаврской работы                                 | И           |
| 5     | Анализ предметной области  | И           |
| 6     | Проверка работоспособности экспериментальной установки                                   | И           |
| 7     | Разработка методики проведения экспериментальных исследований                            | И<br>НР     |
| 8     | Проведение серии предварительных экспериментов по сушке опилок и щепы в сушильной камере | И           |
| 9     | Обработка экспериментальных данных до сушки  | И           |
| 10    | Анализ полученных результатов и сравнение их с существующими работами                    | И<br>НР     |
| 11    | Согласование выполненной работы с научным руководителем                                  | И<br>НР     |
| 12    | Выполнение других частей работы (финансовый менеджмент, социальная ответственность)      | И           |
| 13    | Подведение итогов, оформление работы   | И           |

### 5.3.2. Определение трудоемкости выполнения работ

Для того чтобы определить трудоемкость работ, используются следующие показатели:

- ожидаемое значение трудоемкости,
- продолжительность каждой работы,
- продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях,
- коэффициент календарности.

Расчет ожидаемого значения продолжительности работ  $t_{ож}$  осуществляется согласно формуле:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5},$$

где  $t_{min}$  – минимально возможная трудоемкость  $i$ -ой работы, чел.-дни,

$t_{max}$  – максимально возможная трудоемкость  $i$ -ой работы, чел.-дни.

Далее определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_{pi}$ , которая учитывает параллельность выполнения работ несколькими исполнителями:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i},$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, раб.дни,

$t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дни,

$Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

### 5.3.3. Разработка графика проведения научного исследования

Для построения графика, осуществляется перевод длительности каждого из этапов работ из рабочих дней в календарные дни по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях,

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях,

$k_{кал}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}},$$

где  $T_{кал}$  – количество календарных дней в году,

$T_{вых}$  – количество выходных дней в году,

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

Согласно производственному календарю (для 6-дневной рабочей недели) в 2019 году 365 календарных дней, из них 66 выходных или праздничных дней, следовательно,  $k_{\text{кал}} = 1,22$ .

Расчеты по трудоемкости выполнения работ представлены в таблице 35.



Таблица 35 – Временные показатели осуществления разработки

| №     | Наименование работы  | Исполнители<br>работы | Трудоемкость работ,<br>чел.-дни |                  |                 | Длительность<br>работ, дни |                |
|-------|--|-----------------------|---------------------------------|------------------|-----------------|----------------------------|----------------|
|       |  |                       | t <sub>min</sub>                | t <sub>max</sub> | t <sub>ож</sub> | T <sub>p</sub>             | T <sub>к</sub> |
| 1     | Выбор научного руководителя бакалаврской работы  | И                     | 1                               | 2                | 1,4             | 1                          | 1              |
| 2     | Составление и утверждение темы бакалаврской работы                                       | НР                    | 4                               | 7                | 5,2             | 3                          | 4              |
|       |  | И                     | 4                               | 7                | 5,2             | 3                          | 4              |
| 3     | Составление календарного плана-графика выполнения бакалаврской работы                    | НР.                   | 2                               | 2                | 2               | 2                          | 2              |
| 4     | Подбор и изучение литературы по теме бакалаврской работы                                 | И                     | 7                               | 10               | 8,2             | 8                          | 10             |
| 5     | Анализ предметной области  | И                     | 7                               | 10               | 8,2             | 8                          | 10             |
| 6     | Проверка работоспособности экспериментальной установки                                   | И                     | 4                               | 7                | 5,2             | 5                          | 6              |
| 7     | Разработка методики проведения экспериментальных исследований                            | НР                    | 3                               | 5                | 3,8             | 2                          | 2              |
|       |  | И                     | 3                               | 5                | 3,8             | 2                          | 2              |
| 8     | Проведение серии предварительных экспериментов по сушке опилок и щепы в сушильной камере | И                     | 30                              | 45               | 36              | 36                         | 44             |
| 9     | Обработка экспериментальных данных до сушки  | И                     | 10                              | 14               | 11,6            | 12                         | 15             |
| 10    | Анализ полученных результатов и сравнение их с существующими работами                    | НР                    | 5                               | 7                | 5,8             | 3                          | 4              |
|       |  | И                     | 5                               | 7                | 5,8             | 3                          | 4              |
| 11    | Согласование выполненной работы с научным руководителем                                  | НР                    | 1                               | 3                | 1,8             | 1                          | 1              |
|       |  | И                     | 1                               | 3                | 1,8             | 1                          | 1              |
| 12    | Выполнение других частей работы (финансовый менеджмент, социальная ответственность)      | И                     | 5                               | 7                | 5,8             | 6                          | 7              |
| 13    | Подведение итогов, оформление работы   | И                     | 3                               | 4                | 3,4             | 3                          | 4              |
| Итого |  | НР                    |                                 |                  |                 | 11                         | 13             |
|       |  | И                     |                                 |                  |                 | 88                         | 108            |

### **5.3.4. Бюджет научно-технической разработки**

#### **5.3.4.1. Расчет материальных затрат**

Данная статья затрат включает в себя затраты на приобретение сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих со стороны. Также в эту статью включаются транспортные расходы, равные 15 % от общей стоимости материальных затрат.

Общая сумма материальных затрат включает в себя только затраты на канцелярские принадлежности (250 руб.), для которых не учитываются транспортные расходы. А также затраты на приобретение опилок и щепы в размере 750 руб.

Таким образом, общая сумма материальных затрат составляет 1000 руб.

#### **5.3.4.2. Расчет затрат на специальное оборудование**

В данную статью затрат входят суммы, необходимые на обеспечение амортизации используемого оборудования.

Расчет амортизации персонального компьютера, используемого при написании работы: первоначальная стоимость персонального компьютера составляет 42300 рублей; срок полезного использования для офисных машин – 3 года; планируется использовать персональный компьютер для написания ВКР в течение 4 месяцев. Тогда:

- норма амортизации:

$$A_n = \frac{1}{n} \cdot 100\% = \frac{1}{3} \cdot 100\% = 33,33 \%,$$

- годовые амортизационные отчисления:

$$A_g = 42300 \cdot 0,33 = 14100 \text{ руб.},$$

- ежемесячные амортизационные отчисления:

$$A_m = \frac{14100}{12} = 1175 \text{ руб.},$$

- итоговая сумма амортизации основных средств:

$$A = 1175 \cdot 4 = 4700 \text{ руб.}$$

### 5.3.4.3. Основная заработная плата исполнителей темы

Данная статья расходов включает основную заработную плату с учетом премий и доплат для исполнителей проекта: студента и научного руководителя.

Месячный оклад руководителя ТПУ с должностью доцента и степенью кандидата наук составляет 33664 рубля, для студента был взят оклад ассистента без научной степени – 21760 рублей.

В таблице 36 показаны количества календарных, нерабочих и праздничных дней, дней, пришедшихся на потерю рабочего времени и действительный годовой фонд рабочего времени.

Таблица 36 – Баланс рабочего времени (для 6-дневной недели)

| Показатели рабочего времени                          | Дни |
|--|-----|
| Календарные дни                                      | 365 |
| Нерабочие дни (праздники/выходные)                   | 66  |
| Потери рабочего времени (отпуск/невыходы по болезни) | 56  |
| Действительный годовой фонд рабочего времени         | 243 |

Количество месяцев работы без отпуска принимается за 10,4 (с учетом длительности отпуска в 48 дней). Тогда, зная месячную заработную плату, можно рассчитать среднедневную заработную плату:

$$З_{\text{дн}}^{\text{рук}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot М}{F_{\text{д}}} = \frac{33664 \cdot 10,4}{243} = 1441,76 \text{ руб.},$$

$$З_{\text{дн}}^{\text{студ}} = \frac{З_{\text{м}} \cdot М}{F_{\text{д}}} = \frac{21760 \cdot 10,4}{243} = 931,29 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы осуществляется по формуле:

$$З_{\text{осн}} = З_{\text{дн}} \cdot Т_{\text{р}} \cdot (1 + К_{\text{пр}} + К_{\text{д}}) \cdot К_{\text{р}},$$

где  $З_{\text{дн}}$  – среднедневная заработная плата, руб.,

$Т_{\text{р}}$  – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дни,

$К_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент,

$К_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок,

$К_{\text{р}}$  – районный коэффициент.

Результаты соответствующих расчетов приведены в таблице 37.

Таблица 37 – Расчет основной заработной платы

| Исполнители          | З <sub>дн</sub> , руб. | К <sub>пр</sub> | К <sub>д</sub> | К <sub>р</sub> | Т <sub>р</sub> | З <sub>осн</sub> , руб. |
|----------------------|------------------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------|
| Студент              | 931,29                 | 0,3             | 0,2            | 1,3            | 88             | 159809,36               |
| Научный руководитель | 1441,76                | 0,3             | 0,2            | 1,3            | 11             | 30925,75                |
| Итого                |                        |                 |                |                |                | 190735,12               |

#### 5.3.4.4. Дополнительная заработная плата исполнителей темы

В данную статью расходов входит заработная плата, начисленная рабочим и служащим не за фактически выполненные работы или проработанное время, а в соответствии с действующим законодательством, в том числе оплата очередных отпусков рабочих, времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей.

Зная основную заработную плату, можно рассчитать дополнительную заработную плату в размере 12 % от основной:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}},$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительная заработная плата,

$З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата.

Таблица 38 – Расчет дополнительной заработной платы

| Исполнители          | $k_{\text{доп}}$ | З <sub>осн</sub> , руб. | З <sub>доп</sub> , руб. |
|----------------------|------------------|-------------------------|-------------------------|
| Студент              | 0,12             | 157993,35               | 19177,12                |
| Научный руководитель | 0,12             | 30925,75                | 3711,09                 |
| Итого                |                  |                         | 22888,21                |

#### 5.3.4.5. Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данную статью затрат включаются отчисления в органы социального страхования, пенсионные фонды и отчисления медицинского страхования.

Отчисления во внебюджетные фонды рассчитываются как:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}), \quad (16)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент внебюджетные фонды; в 2019 г., в соответствии с Федеральным законом для учреждений, осуществляющих

образовательную и научную деятельность, используется пониженная ставка – 28%,

$Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата,

$Z_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата.

Таблица 39 – Расчет страховых отчислений

| Исполнители          | $k_{\text{внеб}}$ | $Z_{\text{доп}}$ | $Z_{\text{осн}}$ | $Z_{\text{внеб}}$ |
|----------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Студент              | 0,28              | 18959,20         | 157993,35        | 53695,95          |
| Научный руководитель | 0,28              | 3711,09          | 30925,75         | 10391,05          |
| Итого                |                   |                  |                  | 64087,00          |

#### 5.3.4.6. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов, оплата услуг связи, электроэнергии и т.д. Их величина определяется согласно следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (\text{сумма статей расходов}),$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов, принятый за 16 %.

Таблица 40 – Расчет накладных расходов

| Статьи затрат                               | Сумма, руб. |
|---|-------------|
| Материальные затраты                        | 1000        |
| Затраты на амортизацию                      | 4700        |
| Затраты на основную заработную плату        | 190735,12   |
| Затраты на дополнительную заработную плату  | 22888,21    |
| Затраты на отчисления во внебюджетные фонды | 64087,00    |
| Накладные расходы                           | 45345,65    |

#### 5.3.4.7. Формирование бюджета затрат проекта разработки

Рассчитанные величины затрат научно-исследовательской работы являются основой для формирования бюджета затрат проекта. Результаты составления итогового бюджета разработки представлены в таблице 41.

Таблица 41 – Бюджет затрат на разработку

| Наименование                                | Сумма, руб. | Удельный вес, % |
|---|-------------|-----------------|
| Материальные затраты                        | 1000        | 0,3             |
| Затраты на амортизацию                      | 4700        | 1,43            |
| Затраты на основную заработную плату        | 190735,12   | 58,02           |
| Затраты на дополнительную заработную плату  | 22888,21    | 6,96            |
| Затраты на отчисления во внебюджетные фонды | 64087,00    | 19,49           |
| Накладные расходы                           | 45345,65    | 13,79           |
| Общий бюджет                                | 328755,98   | 100             |

#### 5.4. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп}} = \frac{\Phi_p}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{328755,98}{328755,98} = 1.$$

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_p = \sum a_i \cdot b_i,$$

где  $I_p$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;

$a_i$  – весовой коэффициент;

$b_i$  – балльная оценка.

$$I_p = 0,11 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,05 \cdot 3 + 0,09 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,13 \cdot 3 + 0,1 \cdot 3 + 0,17 \cdot 4 = 4,12.$$

Интегральный показатель эффективности:

$$I = \frac{I_p}{I_{\text{финр}}^{\text{исп}}} = \frac{4,12}{1} = 4,12.$$

### **5.5. Определение потенциального эффекта разработки**

В ходе осуществления оценки конкурентоспособности разработки было установлено, что разработанная система обладает высоким уровнем конкурентоспособности; общая длительность разработки составляет 108 и общий бюджет был оценен в 328755,98 рублей, а интегральный показатель эффективности составил 4,12.

В России и за рубежом непрерывно возрастает интерес к использованию органических веществ растительного происхождения в качестве топлива. Связано это с их возобновляемостью и экологической чистотой. Каждый год на территории нашей страны производится до 14-15 млрд. тонн биомассы, которая сравнима с энергией примерно 8 млрд. тонн условного топлива. Однако биомасса нуждается в подготовке к сжиганию для более эффективного использования. Одним из этапов подготовки является ее сушка. Поэтому задача сокращения времени и повышения объема и качества сушки древесины относится к числу важнейших проблем лесопильно-деревообрабатывающей промышленности.

## **6 Социальная ответственность**

### **Введение**

Социальная ответственность и охрана труда являются важнейшими составляющими любой деятельности, в особенности производственной, т.к. непосредственно связаны со здоровьем и жизнью человека. В понятие социальная ответственность рассматриваются вопросы соблюдения прав персонала на труд, выполнения требований к безопасности и гигиене труда, к промышленной безопасности, охране окружающей среды и ресурсосбережению.

В данной работе проведены серии экспериментов для того, чтобы изучить процесс влагоудаления из отходов лесопиления. Результаты экспериментов будут полезны для дальнейших исследований и доработок по выбранной тематике, а также для математического моделирования, с помощью которого можно будет повысить точность расчета и реализовать потенциал энергосбережения при сохранении качества высушенного изделия.

В данном разделе будут рассмотрены вопросы социальной ответственности для работников лаборатории. Рабочее место должно быть оснащено защитой от возможного воздействия опасных и вредных факторов. Их уровень не должен превышать предельного значения, указанного в правовых, технических и санитарно-технических нормах. При выполнении опытных экспериментов для данной работы большую часть времени приходилось находиться в лаборатории корпуса за выполнением расчетов, записью экспериментальных данных и обработкой их на компьютере.

Вредные факторы, окружающие сотрудника в лаборатории: повышенная запылённость, повышенный уровень шума, повышенный уровень электромагнитных излучений, повышенная или пониженная влажность воздуха, повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны, отсутствие или недостаток естественного света, недостаточная освещенность рабочей зоны, повышенная яркость света, пониженная контрастность.

## **6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **6.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства**

Функции государственного надзора и контроля в организациях независимо от организационно-правовых форм и форм собственности осуществляются специально уполномоченными государственными органами и инспекциями согласно федеральным законам.



Трудовой Кодекс Российской Федерации определяет отдых после окончания рабочего дня или смены.

Трудовой Кодекс также определяет продолжительность рабочего дня. Согласно 91 статье ТК РФ, нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю. Работодатель обязан вести учет времени, фактически отработанного каждым работником.

Каждый работник имеет право на выходные дни, то есть периоды еженедельного непрерывного отдыха. Согласно 110 статье ТК РФ продолжительность еженедельного непрерывного отдыха не может быть менее 42 часов.

Трудовой кодекс РФ не определяет работу за компьютером как вредные условия труда.

Нормативными документами, регламентирующими деятельность работника с использованием ПЭВМ, являются СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03, Гигиенические требования к ПЭВМ и организации труда и Инструкция по охране труда при работе с ПК.

Во время регламентированных перерывов целесообразно выполнять комплексы упражнений и осуществлять проветривание помещения. Не рекомендуется работать за компьютером более 6 часов за смену. Для того чтобы ПЭВМ соответствовали нормам, осуществляется производственный контроль и надзор внутри предприятия-производителя. Эксплуатирующие предприятия также следят за характеристиками используемой аппаратуры.

#### **6.1.2. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Специфика труда оператора заключается в больших зрительных нагрузках в сочетании с малой двигательной активностью, монотонностью выполняемых операций, вынужденной рабочей позой. Эти факторы отрицательно влияют на самочувствие работающего. Зрительные нагрузки связаны с воздействием на зрение дисплея. Чтобы условия труда оператора

были благоприятными, снималась нагрузка на зрение, видеотерминал должен соответствовать следующим требованиям:

- экран должен иметь антибликовое покрытие;
- цвета знаков и фона должны быть согласованы между собой;
- необходимо тщательное регулярное обслуживание ПЭВМ.

Рабочий стол должен иметь пространство для постановки ног, которое составляет: высоту не менее 600 мм, ширину не менее 500 мм, глубину – на уровне колен, не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног – не менее 650 мм.

Поверхность сиденья, спинки и других элементов стула должна быть полумягкой с нескользящим, не электризующимися и воздухопроницаемым покрытием, обеспечивающим легкую очистку от загрязнений.

## **6.2. Производственная безопасность**

Вредные и опасные факторы, воздействующие на сотрудника, устанавливаются согласно ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [42].

Опасные и вредные факторы при выполнении работ представлены в таблице 42.

Таблица 42 – Опасные и вредные факторы

| Факторы<br>(ГОСТ 12.0.003-2015)  | Этапы работ |              |              | Нормативные документы   |
|--|-------------|--------------|--------------|---|
|  | Разработка  | Изготовление | Эксплуатация |   |
| 1.Отклонение показателей микроклимата  | -           | +            | +            | Освещение, шум, статическое электричество, психофизиологические факторы:<br>- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03,<br>- ТОИ Р-45-084-01.<br>Микроклимат:<br>- СанПиН 2.2.4.548-96,<br>- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.  |
| 2. Превышение уровня шума  | -           | +            | +            |   |
| 3.Отсутствие или недостаток естественного света  | +           | +            | +            |   |
| 4.Недостаточная освещенность рабочей зоны  | -           | +            | +            |   |
| 5.Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека | +           | +            | +            | Электрический ток, короткое замыкание:<br>- «Правила устройства электроустановок», утвержденные приказом Главтехуправлением, Госэнергонадзором Минэнерго СССР от 05.10.1979 г.<br>- ГОСТ 12.1.033-81<br>- «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей», утверждённые Приказом Минэнерго России от 13.01.2003 г.<br>- «Межотраслевые правила охраны труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок» (ПОТ РМ 016-2001), утвержденные Постановлением Минтруда России от 05.01.2001 г. № 3. |

## **6.2.1. Анализ вредных факторов проектируемой производственной среды**

### **6.2.1.1. Отклонение показателей параметров микроклимата**

В производственных помещениях, в которых работа с использованием ПЭВМ является основной (диспетчерские, операторские, расчетные, кабины и посты управления, залы вычислительной техники и др.) и связана с нервно-эмоциональным напряжением, должны обеспечиваться оптимальные параметры микроклимата для категории работ 1а и 1б в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами микроклимата производственных помещений. На других рабочих местах следует поддерживать параметры микроклимата на допустимом уровне, соответствующем требованиям указанных выше нормативов.

Содержание вредных химических веществ в производственных помещениях, в которых работа с использованием ПЭВМ является основной, не должно превышать предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест в соответствии с действующими гигиеническими нормативами.

Также указывается, что в помещениях с ПЭВМ должна ежедневно проводиться влажная уборка.

Уставленные гигиенические нормативы для помещений с видео дисплейными терминалами и ПЭВМ для категории работы 1а (работа в положении сидя, не требующая физического напряжения) приведены в таблице 43.

Таблица 43 – Оптимальные величины показателей микроклимата

| Период года | Категория работ по уровню энергозатрат | Температура воздуха, °С | Температура поверхностей, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|--|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Холодный    | 1а                                     | 22-24                   | 20-24                        | 40-60                              | 0.1                            |
| Теплый      | (до 120 ккал/ч)                        | 23-25                   | 21-25                        |                                    |                                |

### 6.2.1.2. Повышенный уровень шума

По характеру спектра в помещении присутствуют широкополосные шумы. Источник шумов – электродвигатели в системе охлаждения и центральная система вентиляции ЭВМ. Допустимый уровень шумов для помещений компьютерных залов 50 дБ определяется СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки» по шкале А шумомера – согласно ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ «Шум. Общие требования безопасности».

### 6.2.1.3. Недостаточная освещенность рабочей зоны

В данном случае к негативным факторам относятся повышенные уровни излучения, а также увеличенная нагрузка на зрительные органы. Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПЭВМ, установлены в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [43] (см. таблицу 44).

Таблица 44 – Требования к освещению на рабочих местах

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| Освещенность на рабочем столе  | 300 - 500 лк                   |
| Освещенность на экране ПЭВМ  | Не более 300 лк                |
| Блики на экране  | Не более 40 кд/м <sup>2</sup>  |
| Прямая блескость источника света   | Не более 200 кд/м <sup>2</sup> |
| Показатель ослепленности   | Не более 20                    |
| Показатель дискомфорта   | Не более 15                    |
| Отношение яркости между рабочими поверхностями                                     | 3:1 - 5:1                      |
| Отношение яркости между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудования | 10:1                           |
| Коэффициент пульсации  | Не более 5 %                   |

Выбор источников света зависит от характера работы, условий среды, размеров помещения.

Лампы накаливания относятся к источникам света теплового излучения. Удобство в эксплуатации, т. е. включение в сеть без дополнительных устройств, отсутствие периода разгорания и простота изготовления ламп в широком диапазоне мощностей делает эти лампы пока ещё очень распространёнными. Эти источники света рекомендуется

применять в помещениях, где производятся относительно грубые работы (нормированная освещённость до 50 лк).

Люминесцентные лампы используются при необходимости создания особо благоприятных условий для зрительной работы (при выполнении точных работ, в учебных заведениях, при работах, требующих различения цветовых оттенков).

При использовании люминесцентного освещения вследствие пульсации светового потока восприятие движущегося объекта может искажаться. Это проявляется в том, что движущийся объект кажется неподвижным или множественным, состоящим из ряда мнимых изображений. Это явление получило название стробоскопического эффекта. Стробоскопический эффект представляет определённую опасность и может явиться причиной несчастного случая. Для устранения этого эффекта необходимо использовать светильники с несколькими люминесцентными лампами, включёнными в разные фазы трёхфазной сети, либо использовать схемы с искусственным смещением фазы.

В рассматриваемом помещении к установке приняты люминесцентные лампы.

#### **6.2.1.4. Повышенный уровень электромагнитного излучения**

ПК является источником повышенного уровня электромагнитных излучений, повышающих риск возникновения сердечно-сосудистых заболеваний и негативно влияющих на нервную систему.

Оценка опасности воздействия электромагнитного поля на человека производится по величине электромагнитной энергии, поглощаемой телом человека, с учетом электрической и магнитной напряженностей поля.

Практически, при обслуживании даже мощных, электроустановок высокого напряжения магнитная напряженность значительно меньше опасной (в 8 раз), поэтому оценку потенциальной опасности воздействия электромагнитного поля достаточно производить по величине электрической напряженности поля. В соответствии с ГОСТ 12.1.002-84 [44],

ССБТ «Электромагнитные поля токов промышленной частоты. Общие требования безопасности», нормы допустимых уровней напряженности электромагнитных полей зависят от времени пребывания человека в контролируемой зоне.

Присутствие персонала на рабочем месте в течение 8 ч допускается при напряженности, не превышающей 5 кВ/м. Основными видами средств коллективной защиты от воздействия электромагнитного поля токов промышленной частоты являются стационарные или переносные заземленные экранирующие устройства. Так как электромагнитное излучение в месте работы не превышает 5 кВ/м, применение экранирующих устройств не требуется.

#### **6.2.1.5. Психофизиологические факторы**

Работа с ПК сопряжена с воздействием вредных психофизиологических факторов, в частности, нервно-психических перегрузок. Для снижения воздействия вредных факторов, устанавливаются перерывы в работе для отдыха сотрудников. Суммарное время регламентированных перерывов при работе с ПК зависит от категории трудовой деятельности и уровня нагрузки за рабочую смену. В таблице 45 приведено суммарное время отдыха для каждой категории работ.

Таблица 45 – Суммарное время отдыха для различных категорий работ

| Категория работы с ПЭВМ | Уровень нагрузки за рабочую смену |                             |                | Суммарное время регламентированных перерывов при 8-часовой смене, мин. |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|----------------|--|
|                         | Группа А, количество знаков       | Группа Б, количество знаков | Группа В, часы |  |
| I                       | до 20 000                         | до 15 000                   | до 2           | 50   |
| II                      | до 40 000                         | до 30 000                   | до 4           | 70   |
| III                     | до 60 000                         | до 40 000                   | до 6           | 90   |

В данном случае уровень нагрузки относится к группе В, категория работы III. Согласно таблице 4, требуется установить перерывы, сумма которых за смену составит не менее 90 минут. По типовой инструкции по охране труда при работе на персональном компьютере ТОИ Р-45-084-01 [45]

для данной категории работ требуется установить перерывы по 15 минут каждый трудовой час.

#### **6.2.1.6. Статическое электричество**

В помещениях, оборудованных ПЭВМ, токи статического электричества чаще всего возникают при прикосновениях персонала к элементам ПЭВМ. Подобные разряды опасности для человека не представляют, однако способны вызывать неприятные ощущения и вывести оборудование из строя.

Для предотвращения образования и защиты от статического электричества в помещении используются нейтрализаторы и увлажнители, полы снабжаются антистатическое покрытие в виде поливинилхлоридного антистатического линолеума, предусматривается использование защитного заземления.

Также в СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [46] установлен максимальный допустимый электростатический потенциал экрана видеомонитора – 500 В.

В качестве мер уменьшения влияния вредных факторов на пользователя используются защитные фильтры для мониторов, увлажнители воздуха. Должны использоваться розетки с заземлением. Требуется проводить регулярную влажную уборку.

#### **6.2.1.7. Электрический ток**

К опасностям использования электрического тока относятся возможность поражения электрическим током, а также воспламенения электронных устройств из-за воздействия различных условий – попадания влаги или повреждения изоляции.

Поражение электрическим током может привести к ожогам, судорогам, повреждению нервной системы, а также смерти. Возникновение пожара может привести к последствиям, описанным в ГОСТ 12.1.033-81 [47].

Во избежание негативных последствий необходимо соблюдать правила пожарной и электрической безопасности. Подготовка к возникновению данных ситуаций должна производиться до начала работы.



### **6.2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов на исследователя**

По итогам анализа было установлено:

- освещение на рабочем месте соответствует нормам – используется несколько энергосберегающих ламп;
- уровни шума находятся в допустимых пределах – источником шума при эксплуатации ПК могут являться системы охлаждения и хранения постоянной памяти, однако уровень создаваемого ими шума находится в пределах нормы;
- микроклиматические условия соблюдаются за счет использования систем отопления и кондиционирования и соответствуют установленным нормам;
- защита от повреждений статическим электричеством обеспечивается путем защитного заземления и соблюдения правил безопасности на рабочем месте;
- во время работы делаются перерывы для снижения нагрузки и предотвращения нервно-психических перегрузок;
- помещение оборудовано согласно требованиям электробезопасности;
- регулярно проводится влажная уборка помещения.

### **6.3. Экологическая безопасность**

Для проведения обработки результатов экспериментального исследования необходим ПК, в таком случае происходит воздействие на литосферу при его утилизации.

Федеральный закон № 89 от 1998 г. «Об отходах производства и потребления» запрещает юридическим лицам самовольно избавляться от опасных отходов. Этим видом деятельности, согласно постановлению Правительства РФ № 340 от 2002 г., могут заниматься только специализированные структуры. В их число входят и фирмы, которые

занимаются утилизацией электронных отходов. Обращение с отходами регламентируется ГОСТ Р 53692-2009 «Ресурсосбережение. Обращение с отходами» [48].

При необходимости утилизировать вышедшую из употребления электронику наиболее безопасным для окружающей среды способом является обращение в специализированную компанию по утилизации. Такие компании действуют на всей территории Российской Федерации, в том числе и в Томской области. Необходимо отметить, что, в общем, при работе с компьютером существенного загрязнения окружающей среды не происходит и вредные выбросы значительно меньше производственных.

#### **6.4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией при экспериментальном исследовании процесса влагоудаления из слоя отходов лесопиления является пожар на рабочем месте. В качестве противопожарных мероприятий должны быть применены следующие меры:

- в помещении должны находиться средства тушения пожара, средства связи;
- электрическая проводка электрооборудования и осветительных приборов должна быть исправна;
- все сотрудники должны знать место нахождения средств пожаротушения, средств связи и номера экстренных служб;
- все сотрудники должны иметь компетенции по использованию указанных выше средств пожаротушения и связи.

В связи с возможностью возникновения пожара разработан следующий план действий:

- в случае возникновения пожара сообщить о нем руководителю, постараться устранить очаг возгорания имеющимися силами при помощи первичных средств пожаротушения (огнетушитель порошковый, углекислотный О-1П0 (з)-АВСЕ);

- привести в действие ручной пожарный извещатель, если очаг возгорания потушить не удастся;
- сообщить о возгорании в службу пожарной охраны по телефону 01, 101 или 112; сообщить адрес, место и причину возникновения пожара;
- принять меры по эвакуации людей;
- встретить пожарную охрану, при необходимости сообщить всю необходимую информацию и оказать помощь при выборе наилучшего маршрута к очагу возгорания.

Рабочее помещение, в котором проводился эксперимент, оборудовано в соответствии с требованиями пожарной безопасности: имеются порошковый огнетушитель, пожарная сигнализация и соответствующие средства связи.

### **Заключение**

В разделе «Социальная ответственность» рассмотрена лаборатория, использовавшаяся для проведения экспериментальных опытов, на предмет возникновения вредных (освещенность, электромагнитные поля) и опасных факторов (термического характера, электрической природы). Описано действие факторов на организм человека, предложены средства коллективной и индивидуальной защиты. Также представлены правила безопасности при проведении экспериментальных исследований.

## **Заключение**

В рамках выпускной квалификационной работы было проведено теоретическое исследование процесса влагоудаления из слоя лесного горючего материала на основе отходов лесопиления и деревообработки (щепа и опилки). Также разработаны рекомендации для проведения эксперимента, которые позволят организовать процесс сушки биомассы.

Во время выполнения работы были получены экспериментальные зависимости массовой скорости испарения жидкости из щепы и опилок хвойных пород деревьев от температуры и времени, позволяющие выбрать наиболее экономичный режим обезвоживания биомассы. Проведен расчет коэффициента аккомодации при заданных параметрах сушки и найдено парциальное давление. Проведена оценка результатов экспериментальных данных согласно теории инженерного эксперимента.

Вдобавок выполнены разделы «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» и «Социальная ответственность». В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» был проведен анализ конкурентных технических решений, составлен перечень работ и проведена оценка времени их выполнения, составлена смета затрат на проект, а также определены ресурсная, финансовая, бюджетная, социальная и экономическая эффективность проводимого исследования. В разделе «Социальная ответственность» рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, проведен анализ вредных факторов проектируемой производственной среды, также рассмотрен вопрос экологической безопасности проводимого исследования и оценены возможные чрезвычайные ситуации.

### Список литературы

1. Козьмина И.А. Влияние породы древесины на свойства древесно-композиционного материала // Высокие интеллектуальные технологии в науке и образовании материалы I Международной научно-практической конференции. - 2017. - С 110-111.
2. Михайличенко А.Л., Садовничий Ф.П. Древесиноведение и лесное товароведение // Учеб. Пособие для проф.-техн. училищ: М., «Высшая школа». - 1974. - 223с.
3. Михайлова Ю.С., Платонов А.Д., Курьянова Т.К. Влияние продолжительности процесса сушки на качество древесины твердых пород // Лесотехнический журнал №4. - 2011. - С 33-38.
4. Филичкина М.В. Эффективное использование древесных отходов в производстве биотоплива // Воронежский государственный лесотехнический университет. - 2008. С 339-343.
5. Альберг Н.И., Санжиева С.Е., Салхофер С. Комплексное устойчивое управление отходами Деревообрабатывающая и целлюлозно-бумажная промышленность // Учебное пособие. - 2016. - С 45-54.
6. Цыгарова М.В. Комплексное использование древесины // Учебное пособие: самост. учеб. электрон. изд. - Сыктывкар, 2015. – 125 с.
7. Никишов В.Д. Комплексное использование древесины // Учебник для вузов: Лесн. Промышленность. - 1985. - 264 с.
8. Фридман И.М. Деревообработка: практическое руководство // Спб: ПрофиКс. - 2006. 543 с.
9. Михайлов Г.М., Серов Н.А. Пути улучшения использования вторичного древесного сырья // Лесная промышленность. - 1988. 224 с.
10. Коротаев Э.И., Симонов В.И. Производство строительных материалов из древесных отходов // Лесная промышленность. - 1972. 144 с.
11. Журавлева Л.Н., Девятловская А.Н. Основные направления использования древесных отходов // Лесосибирский филиал СибГТУ.

12. Савельев М.С. Биотопливо на основе древесных отходов // Российский внешнеэкономический вестник №12. - 2007. – С 4-9.
13. Древесиноведение и лесное товароведение. Уголев Б. Н. : Изд-во Академия, - 2006. – 272 с.
14. Рассев А.И. Сушка древесины // Лесная промышленность. - 1990. - 224 с.
15. Курьянова, Т. К. Сушка древесины и ее качество после предварительной химической обработки Текст. / Т. К. Курьянова, А. Д. Платонов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2004. - № 6. - С. 52-56.
16. Харитонов Г.Н., Добрынин С.В. Лесосушильные камеры // Лесная промышленность. - 1999. - 204 с.
17. С.Г. Горохов, Э.Н. Сабуров, В.К. Любов . ИВУЗ. «Лесной журнал». 2004. № 4.
18. Биомасса древесины и биоэнергетика в 2 т. / Л. А. Занегин, И. В. Воскобойников, В. А. Кондратюк, В. М. Щелоков. - М. : Изд-во МГУЛ, 2008 Т. 2. - 2008. - 456 с. : ил. - Библиогр.: с. 450-456
19. Сушка древесины. Кречетов И.В. – М. : изд-во Лесная промышленность, - 1980. – 454 с.
20. Сафин Р.Р., Хакимзянов И.Ф., Губернаторов В.В. Энергосбережение в процессах сушки древесины и растительного сырья // МНТФ Первые Косыгинские чтения. Симпозиум Том 1. - 2017. - С 89-93.
21. Сеницын Н.Н., Телин Н.В., Домрачев Д.А. Исследование конвективного теплообмена при сушке коры деревьев в плотном слое // Вестник Череповецкого государственного университета №3. - 2016. - С 24-28.
22. Воронцов А.С. Структура многоцелевых математических моделей процесса сушки древесины // Лесотехнический журнал №3. - 2012. - С 108-113.
23. Древесиноведение и лесное товароведение. Уголев Б. Н. : Изд-во Академия, - 2006. – 272 с.

24. Курьянова, Т. К. Сушка древесины и ее качество после предварительной химической обработки Текст. / Т. К. Курьянова, А. Д. Платонов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2004. - № 6. - С. 52-56.
25. Ларин В. Эффективное сжигание древесных отходов // «Энергия: экономика, техника, экология» №5. - 2014. - С 56-60.
26. Дзядикевич Ю.В., Розум Г.И., Буряк М.В. Особенности процесса сжигания древесной биомассы и пути его улучшения // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит №10. - 2010. - С 41-45.
27. Любов В.К., Попов А.Н., Малыгин П.В. Исследование эффективности сжигания древесного биотоплива в теплогенерирующей установке // Лесной журнал №4. - 2017. - С 149-161.
28. Нижников А.В., Савенок В.Е. Пути снижения выборов загрязняющих веществ при сжигании местных видов топлива в котельных установках // УО «ВГТУ». - 2017. - С 329-332.
29. Любов В.К., Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплива // учеб.пособие. Архангельск: Солти. - 2010. 496 с.
30. Ковалев А.Н. Особенности эффективного использования древесной биомассы в качестве топлива // Республиканское унитарное предприятие. - С 210-213.
31. Корзун И.И. Современные технологии заготовки и подготовки к использованию древесного топлива // Тр. Бел. Гос. технол. ун-та. Сер. VII. Экономика и управление №XIV. - 2006. - С 211-214.
32. Сендецкий В. Вторичные древесные ресурсы // Дерево. Июль-август 2008. - С 196-199.
33. Суханов В.С. Производство собственной энергии // Дерево № 6. - 2005. - С 22-25.
34. Мачина А.Е. Древесное биотопливо: Синергетический эффект производства и использования // С 88-92.

35. Биденко С.И., Сердитова Н.Е., Травин С.В. Информационное пространство управления региональной эколого-экономической активностью // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. - 2015. - №41. - С 212-219.
36. Сердитова Н.Е., Осетрова М.Л. Эколого-экономический анализ устойчивого лесопользования и развития предприятий целлюлозно-бумажной промышленности // Вестник Тверского государственного университета. Серия: География и геоэкология. - 2016. - №1. - С 12-17.
37. Андреев А.А., Зайцева М.И., Колесников Г.Н., Чалкин А.А. Технологии использования отходов лесопиления для устойчивого развития приграничных регионов на севере России // В сборнике: Классический университет в пространстве трансграничности на Севере Европы: стратегия инновационного развития материалы Международного форума. - 2014. - С 3-6.
38. Гуляев Г.Ю. Строительство // В книге: Современные подходы к обеспечению конкурентоспособности региона, отрасли, предприятия. – Пенза. - 2016. - С 101-103.
39. Леканова Т.Л., Андронов А.В., Шкурлей Н.И. Использование древесных отходов для производства электрической энергии в режиме мини-ТЭЦ. - С 257-269.
40. Ларин В. Биотопливо вместо мазута // Энергия: экономика, техника, экология №6. - 2014. - С 50-53.
41. Колесников Г.Н., Андреев А.А., Чалкин А.А. Отходы лесопиления (опилки) как сырье для изготовления древесно-цементного материала с микродобавкой аморфного диоксида кремния // Успехи современной науки и образования. - 2016. - №8. - С 68-71.
42. ГОСТ 12.0.003-2015. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. – Введ. 01.03.2017 – М.: Изд-во стандартов, 2016. – 16 с.
43. СНиП 23-05-95 «Естественное и искусственное освещение».



44. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы: Санитарно-эпидемиологические правила и нормы. – М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2003. – 54 с.
45. ГОСТ 12.1.002-84. Электрические поля промышленной частоты. – Введ. 01.01.86 – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 7 с.
46. ТОИ Р-45-084-01. Типовая инструкция по охране труда при работе на персональном компьютере. – Утверждено Приказом Минсвязи РФ от 2 июля 2001 г. № 162
47. ГОСТ 12.1.033-81. ССБТ. Пожарная безопасность. Термины и определения. – Введ. 01.07.1982 – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 9 с.
48. ГОСТ Р 53692-2009. Ресурсосбережение. Обращение с отходами. – Введ. 15.12.2009 – М.: Изд-во стандартов, 2011. – 20 с.
49. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений: Санитарные правила и нормы: – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 2001. – 20 с.